SEPTEMBRE 2026
HORS SÉRIE 327 BIOTECHNOLOGIE
SCIENCE&VIE

Énergies propres, mycorhize, matériaux,
engrais spatial, psychiatrie, ordinateur fongique

Mycoscience

Les champignons, avenir des biotechs ?

REWORLD MEDIA
BEL : 7,10€ - ESP : 7,20€ - GR : 7,20€ - DOM S : 7,60€ - DOM A : 8,90€ - ITA : 7,20€ - LUX : 7,10€ - PORT CONT : 7,20€ - CAN : 10,50$CAN - MAR : 73,00DH - TOM S : 990,00CFP - TOM A : 1850CFP - CH : 10FS - TUN : 15DTU

MÉDECINE, ROBOTIQUE, BIOLOGIE, PALÉONTOLOGIE…

L'information scientifique Mise À Jour

Votre rendez-vous avec l'actualité de la recherche

L 19057 - 327 H - F: 6,90 € - RD

french mush

AB AGRICULTURE BIOLOGIQUE

L'expert français des *champignons fonctionnels*

Compléments alimentaires sous forme de gélules, poudres, gummies et boissons.

www.frenchmush.com

Édito

HORS SÉRIE SCIENCE&VIE

327

SEPTEMBRE 2026

Une publication du groupe
REWORLD MEDIA
LEADING MEDIA GROUP

ÉDITEUR
Reworld Media Magazines SAS
Siège social : 40 avenue Aristide-Briand, 92220 Bagneux
Directeur de la publication : Gautier Normand
Actionnaire : Reworld Media France
(RCS Nanterre 477 494 371)
Tél. accueil : 01 41 33 55 00
www.science-et-vie.com
SERVICE LECTEURS : sev.lecteurs@reworldmedia.com

RÉDACTION
DIRECTRICE DE LA RÉDACTION : Danielle McCaffrey
ASSISTANTE DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE ET SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE : Christelle Borelli

RÉALISATION SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE
COM'Presse. 6 rue Tarnac, 47220 Astaffort. Tél. 05 53 48 17 60
RÉDACTEUR EN CHEF : Olivier Carpentier
RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE : Amanda Schrepf Sanz
DIRECTEUR ARTISTIQUE : Emilien Guillon
RÉDACTRICE PHOTO : Géraldine Lafont
SECRÉTAIRES DE RÉDACTION :
Lita Doval, Vincent Ourso, Olivier Vignancour
ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO : Kheira Bettayeb, Riva Brinet-Spiesser, Mathias Chaillot, Adrien Denèle, Michael Ducousso, Coralie Hancok, Pascale-Emmnualle Lapernat-Guilhaumon, Charlotte Leduc, Hugo Leroux, Céline Lison, David Marchand, Héloïse Rambert, Paule-Emilie Ruy, Natacha Scheidhauer

DIRECTION-ÉDITION
ÉDITEUR : Germain Périnet
ÉDITRICE ADJOINTE : Charlotte Mignerey

PUBLICITÉ
DIRECTRICE GÉNÉRALE : Élodie Bretaudeau-Fonteilles
DIRECTRICE DU PÔLE COMMERCIAL : Catherine Mireux (19 02)
DIRECTRICE DE LA PUBLICITÉ : Anne Lefeuvre
DIRECTEUR DE LA PUBLICITÉ : Fabrice Guillemain (06 16 55 55 42)
PLANNING : Angélique Consoli (53 52), Stéphanie Guillard (53 50)
RESPONSABLE TRAFIC : Catherine Leblanc (43 86)

MARKETING / INTERNATIONAL
RESPONSABLE MARKETING : Giliane Douls
DIRECTRICE DE LA COMMUNICATION : Laure Charvet

ABONNEMENTS ET DIFFUSION
DIRECTRICE MARKETING DIRECT : Catherine Grimaud
CHEF DE PRODUIT MARKETING DIRECT : Laure Letellier
RESPONSABLE SERVICE DIFFUSION : Philippe Merrien
RESPONSABLE DES VENTES : Arthur Marec

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
Une question sur votre abonnement ? Appelez-nous au **01 46 48 48 96** (de 9 h à 19 h, du lundi au vendredi, et le samedi de 9 h à 18 h, prix d'un appel local).
Pour toute réclamation/modification concernant votre abonnement : www.serviceabomag.fr
Retrouver toutes nos offres sur www.kiosquemag.com
Par courrier : **Service abonnement *Science & Vie*, 59898 LILLE Cedex 9**

Prix de vente : 6,90 €
Prix de l'abonnement annuel : 61,20 € (12 numéros) ou 102,60 € (12 numéros + 6 hors-séries)

Pour les États-Unis et le Canada : Express Mag, 8155 rue Larrey, Anjou (Québec), H1J 2L5. Tél. 1 800 363-1310 (français) et 1 877 363-1310 (anglais) ; fax (514) 355-3332.
Pour la Suisse : Edigroup Suisse, 022 860 84 50
reworld@edigroup.ch
Pour la Belgique : Edigroup Belgique, 070 233 304
reworld@edigroup.be
Autres pays : nous consulter.
Commande d'anciens numéros et de reliures au 01 46 48 48 83

FABRICATION
DIRECTION DES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES : Bruno Matillat
CREATOPRINT

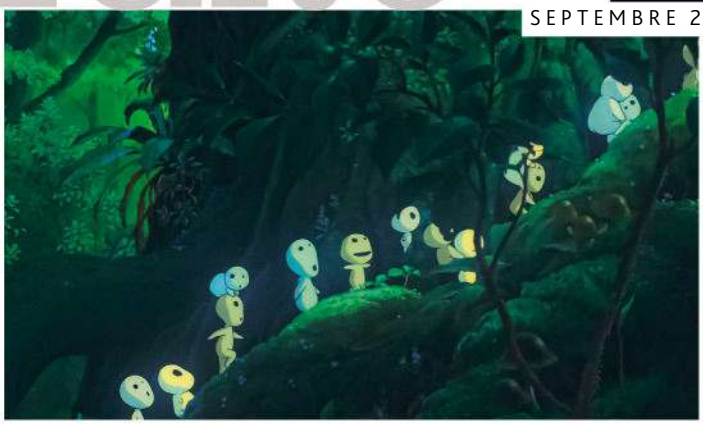
PRÉPRESSE
RESPONSABLE DE SERVICE : Sylvain Boularand

Imprimeur : Maury – France
N° ISSN : 1966-9437
N° de commission paritaire : 1031 K 79977
Dépôt légal : août 2026

PEFC
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées
www.pefc-france.org

FR

EN COUVERTURE : ADOBE STOCK, CI-CONTRE : HBO



Des elfes aux hyphes

C'est l'histoire d'un champignon hallucinogène très intégré à la gastronomie locale. *Lanmaoa asiatica*, un bolet du Yunnan, province montagneuse de Chine, est un symbiote ectomycorhizien : son mycélium, réseau souterrain de fins filaments (ou hyphes), colonise l'extérieur des radicelles du pin du Yunnan, espèce forestière à laquelle il est étroitement associé. Le bolet apporte à l'arbre des nutriments et de l'eau ; en échange, le pin lui fournit des molécules carbonées. Ce réseau mutualiste est si fonctionnel qu'on le soupçonne de transmettre des informations – stress hydrique, attaques de parasites… – d'arbre en arbre, d'où son surnom de *"Wood Wide Web"*. Tout cela, les amateurs locaux de *Lanmaoa asiatica* – des paysans du Yunnan, donc – l'ignorent peut-être. En revanche, ils ont bien noté une autre de ses caractéristiques. Consommé cru, *Lanmaoa asiatica* fait apparaître… des myriades de petits humanoïdes ! Aussi, les restaurants qui le proposent le servent-ils avec un minuteur réglé sur 15 minutes – le temps qu'il faut pour détruire, par cuisson, la molécule provoquant ces effets hallucinatoires. Que nous dit cette anecdote ? D'abord, que *Lanmaoa asiatica*, comme tous les champignons, est un formidable laboratoire à molécules dites "d'intérêt scientifique". Son cousin européen, le psilocybe, produit une "psilocybine" dont les chercheurs révèlent les qualités médicinales, notamment pour soigner la dépression. Ensuite, que les habitants du Yunnan ont appris, comme les plantes, à utiliser au mieux le potentiel nutritionnel des champignons. Quitte à voir apparaître de petits elfes dans leur bol de riz. Ou quitte, pour les plantes, à se laisser coloniser par le mycélium du bolet. Les Mycètes, dont 90 % des espèces restent à découvrir, ouvrent des perspectives scientifiques inouïes. Les mycologues dévoilent chaque matin de nouvelles propriétés fongiques qui pourraient, à terme, révolutionner les biotechnologies. Traitements anticancéreux, matériaux de construction, piles, enzymes dépolluantes, germes dévoreurs de plastiques, microprocesseurs fongiques… Avec ou sans elfes, cela fait rêver.

Olivier Carpentier

HORS SÉRIE SCIENCE&VIE 327

Sommaire

SEPTEMBRE 2026

AVANT-PROPOS

06 “La biodiversité fongique est une bibliothèque vivante de solutions”
Les biologistes Toby Kiers et Marc-André Selosse explorent les promesses des champignons pour la santé, l’agriculture, le climat et la restauration des écosystèmes, sans éluder les limites de la mycoscience.

COMPRENDRE

16 Que sont les champignons ?
Ni plantes ni animaux, ils nourrissent le vivant et restent largement méconnus.

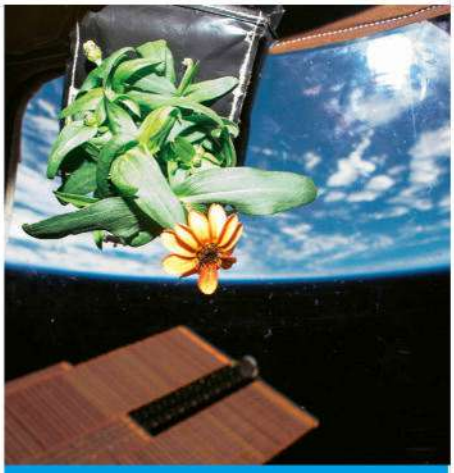
24 1 milliard d’années avant la girolle
Champignons et plantes auraient scellé un pacte vieux de 500 millions d’années, décisif pour la conquête des continents.

28 Trésors d’un monde caché
Bioluminescents, toxiques ou médicinaux, sept champignons révèlent l’extraordinaire inventivité de leur règne.

Recevez Science & Vie et ses Hors-Série
Votre bulletin d’abonnement se trouve en p. 93. Pour commander d’anciens numéros, rendez-vous sur www.kiosquemag.com

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par internet sur www.kiosquemag.com

© ADOBE STOCK (X2) - ARNE IMMANUEL BÄNSCH/DPA/PHOTONONSTOP - NASA PHOTO/ALAMY/HEMIS.FR



SOIGNER

36 **Une chance pour la médecine du futur**
Des moisissures aux champignons comestibles, leurs molécules pourraient combattre cancers, infections et maladies rares.

42 **“Profitons des bienfaits du champignon de Paris !”**
Laurence Plumey, médecin nutritionniste, décrypte ses vertus et met en garde contre les idées reçues.

46 **Une arme fatale contre la dépression**
La psilocybine pourrait soulager les dépressions résistantes, à condition d’être associée à un suivi médical strict.

50 **Promesses d’un monde invisible**
Des abysses à la plastisphère, les spécimens marins pourraient fournir médicaments et enzymes pour dépolluer.

54 **Cultivateurs à six pattes**
Fourmis, termites et coléoptères les bichonnent depuis des millions d’années pour mieux se nourrir.

56 **Des alliés de longue date**
Du briquet d’Ötzi au miso, ils accompagnent l’humanité depuis la préhistoire, entre remèdes et poisons.

COMBATTRE

64 **Tueurs en série**
Fourmis zombies, grenouilles décimées, arbres ravagés : les champignons pathogènes menacent des écosystèmes entiers.

68 **Fusariose, la terreur des bananes**
Clonée à l’extrême, la banane Cavendish est menacée par un champignon que croisements et CRISPR tentent de contrer.

70 **Alerte à l’invasion fongique**
Des famines historiques aux infections résistantes, le réchauffement climatique accroît la menace.

INVENTER

78 **Agriculture : 5 super pouvoirs des champignons**
Plastiques, sols pollués, cultures fragiles, ces pouvoirs fongiques promettent de révolutionner le secteur.

84 **Micromycètes vs marée noire**
Trois moisissures capables de dégrader le pétrole pourraient bientôt achever le nettoyage des océans.

86 **Ils poussent comme des champignons !**
Emballages, cuir, panneaux, batteries : le mycélium inspire des matériaux biodégradables aux usages étonnants.

90 **Bientôt un ordi shiitaké ?**
Andrew Adamatzky, chercheur pionnier du calcul fongique, explique comment le mycélium peut mémoriser et traiter des signaux.

94 **Les vrais colons de l’espace**
Intrus tenaces de l’ISS, ils pourraient aussi protéger des radiations et bâtir les habitats martiens.

100 **Biblio**

PAGE 101

“MÀJ” COMME MISE À JOUR

L’Ozempic lutte-t-il contre la criminalité ? Nos cerveaux peuvent-ils survivre hors de notre corps ? Les robots peuvent-ils faire de l’escalade ? Douze pages d’actualité scientifique et de questions-réponses pour faire le point sur vos thématiques favorites.

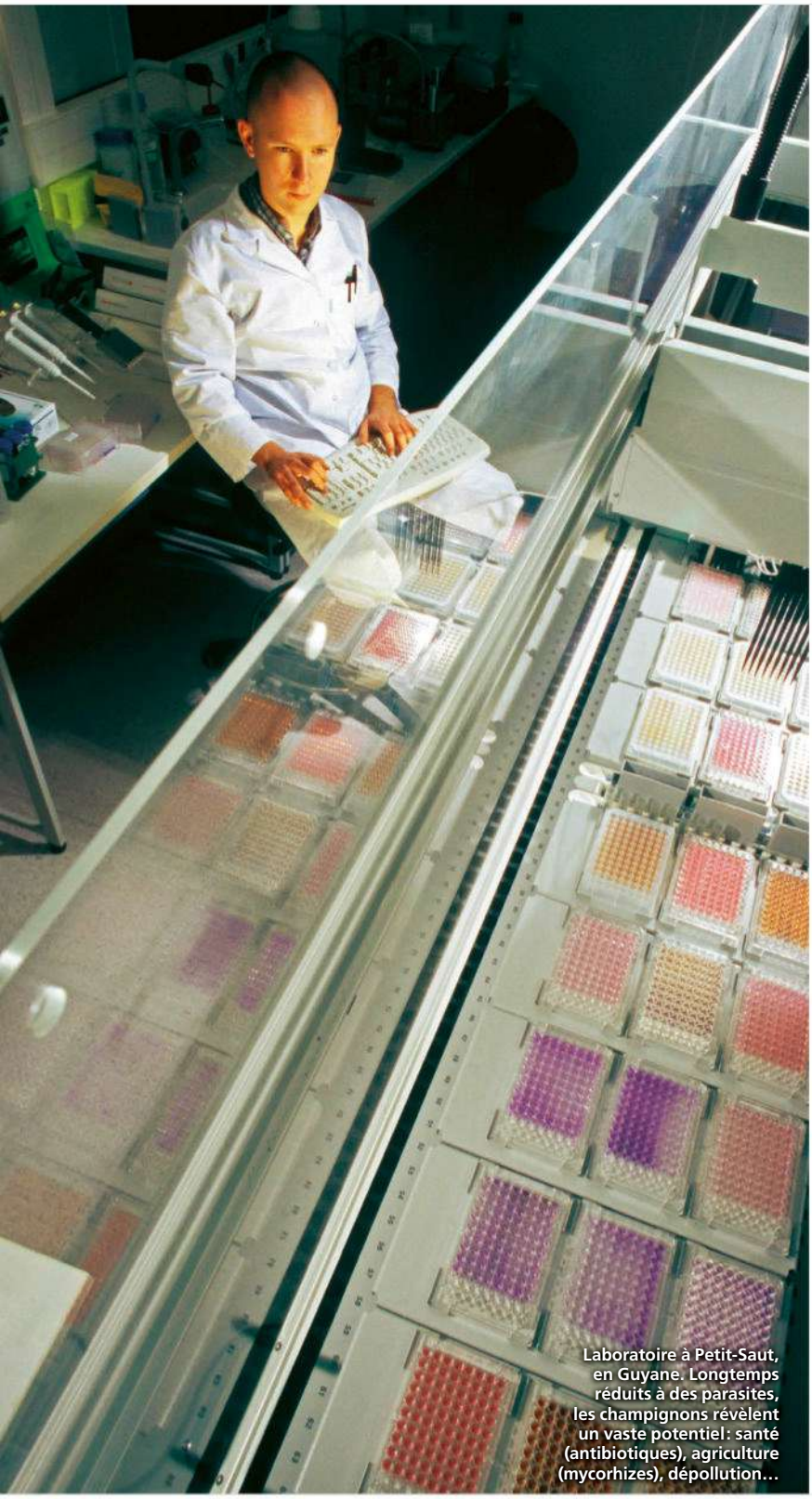
“La biodiversité fongique est une bibliothèque vivante de solutions”

Qu’est-ce que les champignons ont à nous apprendre, et quelles nouvelles portes la mycoscience peut-elle ouvrir ? Entretien avec les professeurs Toby Kiers * et Marc-André Selosse **.

PAR MATHIAS CHAILLOT

SVHS : Quelles sont les possibilités promises par la mycoscience ?

Toby Kiers : C’est une science de frontière. La mycologie progresse depuis des décennies, mais le rythme s’accélère grâce à de nouveaux outils – l’apprentissage automatique, la robotique, les données satellitaires… – qui nous permettent d’étudier les champignons in situ, dans leurs écosystèmes. Avant, on les amenait au laboratoire et on se concentrait sur les espèces les plus connues, celles qui forment des carpophores visibles *[ce que nous appelons généralement “champignons”, en réalité leur organe reproducteur, NDLR]* ou ont une importance économique, comme les levures. Aujourd’hui, ces outils nous donnent accès à ce monde caché : qui est

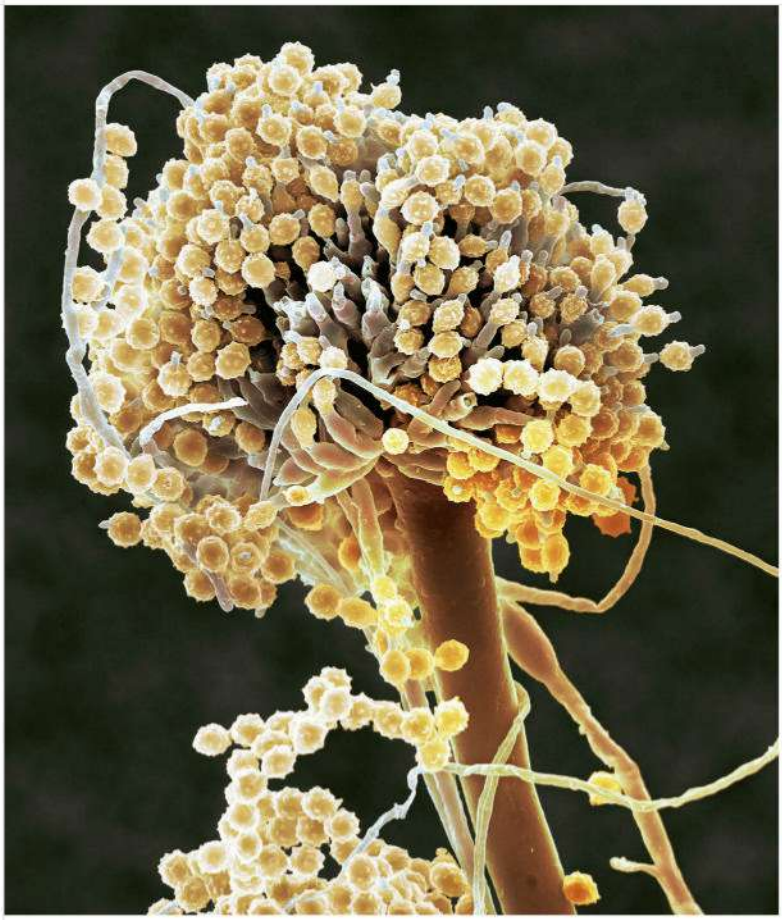


Laboratoire à Petit-Saut, en Guyane. Longtemps réduits à des parasites, les champignons révèlent un vaste potentiel : santé (antibiotiques), agriculture (mycorhizes), dépollution…

© PATRICK LANDMANN/SPL

présent, et comment ces organismes fonctionnent réellement, y compris les plus discrets.

Marc-André Selosse : 150 000 espèces seulement sont décrites, et nous en décrivons encore environ 500 par an : il faudrait des milliers d'années pour inventorier les trois à dix millions d'espèces qui existent ! Nous avons heureusement d'autres approches, notamment l'ADN : on peut désormais savoir qu'une espèce est présente dans un sol grâce à son ADN de référence. Ce n'est pas aussi précis qu'une culture, mais on a ainsi découvert qu'on ne sait cultiver qu'environ 1 % des espèces. On peut aller plus loin : la méthode de fluorescence in situ, qui rend fluorescentes les cellules des champignons ciblés par leur ADN, a révélé des groupes de champignons sans parois, ou pourvus de flagelles pour se déplacer à certains stades. Songez aussi qu'il y a probablement autant de champignons dans l'eau que sur terre, avec peu de chercheurs pour les étudier. Par rapport aux plantes et aux animaux, c'est une connaissance balbutiante, et les potentiels d'utilisation le sont tout autant. Il faut aussi se méfier des effets d'annonce : on parle souvent de la découverte d'un champignon aux vertus anticancéreuses, mais c'est toujours en boîte de Petri. Le potentiel découvert in vitro est immense ; la mise en application sera beaucoup plus longue. Autre exemple : les champignons mangeurs de plastique. La possibilité



Vue colorisée au microscope électronique d'*Aspergillus versicolor*. Ce champignon courant dans les lieux humides peut libérer une mycotoxine, la stérigmatocystine, étudiée pour mieux évaluer les risques liés aux moisissures intérieures.

est démontrée, mais dans la nature, les champignons en question ont l'air moins efficaces…

SVHS : Le fait qu'il s'agisse d'un règne mal connu et distinct des plantes et des animaux est-il une chance ou un handicap pour la recherche ?

M.-A.S. : À la question "sont-ils plus proches des animaux ou des plantes ?", je réponds que la dichotomie ne fonctionne pas, les champignons sont un groupe à part entière, appartenant au monde microbien. Leur fonctionnement est complètement différent, et c'est là que réside leur potentiel. Par exemple, ils digèrent en émettant des enzymes à l'extérieur de leurs filaments, produisant des molécules qui profitent à tout le monde alentour. Quand vous digérez dans votre tube digestif, vous êtes propriétaire du résultat ; pour les champignons, c'est ouvert à tous. Conséquence : ils produisent des antibiotiques pour empêcher les bactéries de proliférer dans leur nourriture digérée, dont certains nous servent directement.

> *"Dans un sol ordinaire, non enrichi en phosphore et en azote, les plantes meurent sans les champignons"*

© DENNIS KUNKEL MICROSCOPY/SCIENCE PHOTO LIBRARY

De petits carpophores émergent de la mousse. Ces fructifications ne sont que la partie visible d'un réseau souterrain, le mycélium, essentiel au recyclage de la matière organique et étudié pour ses molécules d'intérêt médical.

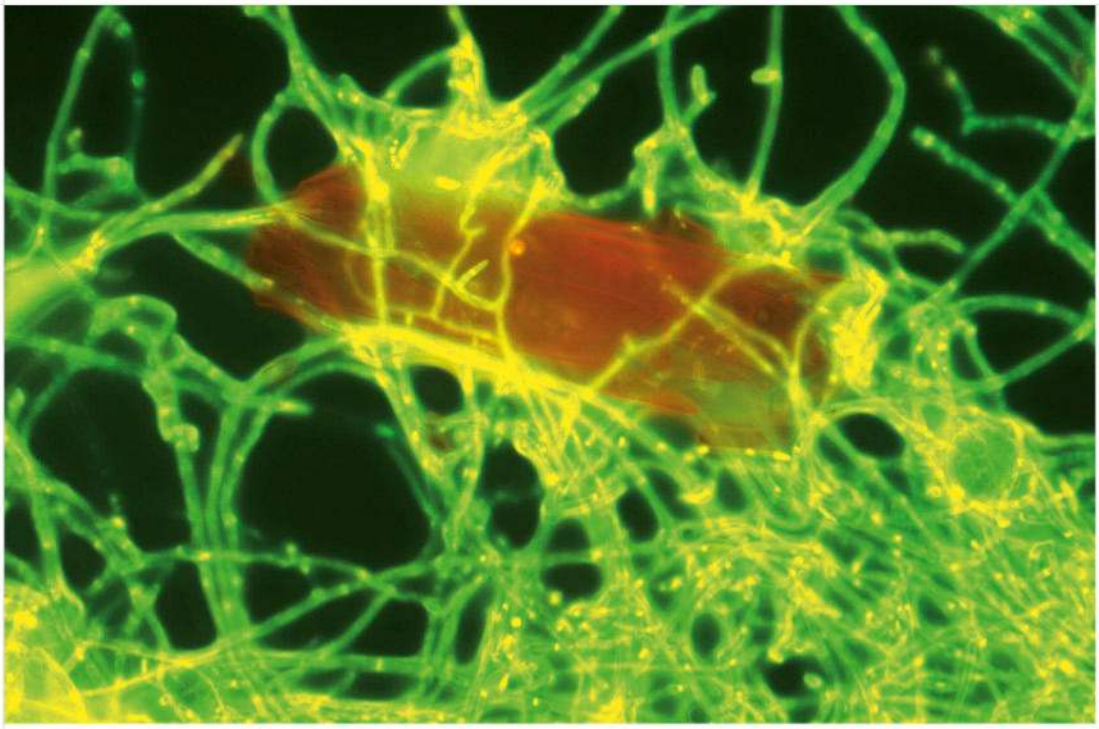
Ils produisent aussi les statines, utilisées contre le cholestérol, sans équivalent connu, ou les ciclosporines, qui nous permettent d'éviter les rejets de greffe. De ce fonctionnement différent peuvent émerger des applications multiples. Toutefois, parmi les eucaryotes, les champignons partagent un ancêtre commun avec les animaux, datant d'il y a un à deux milliards d'années, et l'ensemble forme un groupe frère des plantes. Cette proximité avec les animaux a une conséquence : beaucoup de fongicides sont peu recommandables pour la santé humaine, car leurs cibles chimiques sont proches des nôtres. Morphologiquement, les animaux ont divergé des champignons, mais chimiquement, les proximités restent fortes.

T.K. : Les champignons remettent en cause beaucoup de nos certitudes : notre conception de l'individu, de la reproduction, de la survie… Ils interrogent même le fonctionnement des cellules. Je pense à ces lichens envoyés dans l'espace et capables d'y survivre. Les spores que nous étudions sont parmi les plus riches en noyaux du monde vivant, elles peuvent en renfermer des centaines. Faute de cloisons transversales, certaines de leurs cellules figurent parmi les plus longues de la planète. Ils défient aussi notre définition de l'efficacité : attachés aux racines, les champignons mycorhiziens forment des chaînes d'approvisionnement hyper efficaces, faisant entrer du carbone dans le sol tout en remontant des nutriments vers la plante. Leur complexité n'est pas un handicap, c'est une invitation. Le seul vrai handicap, c'est qu'ils exigent de la patience. Au laboratoire, en plaisantant, nous les surnommons les "divas" : parfois ils poussent, parfois non. Notre démarche tient dans une question simple, mais profonde, que nous posons aux champignons parce qu'ils perçoivent le monde autrement : "Qu'est-ce que ça fait d'être toi ?"

SVHS : ***La symbiose mycorhizienne intrigue le grand public. Sommes-nous en train d'en faire un mythe moderne ou est-ce à l'inverse une réalité sous-estimée ?***

T.K. : Les deux à la fois, et c'est pour cela qu'une science rigoureuse est essentielle : quand le monde s'enthousiasme, le danger est de voir les espoirs prendre le pas sur la science. Pourtant, nous n'avons pas commencé à en saisir la complexité. Ces champignons forment l'un des systèmes circulatoires souterrains de la Terre : attachés aux racines, ils déplacent d'énormes quantités de carbone tout en faisant remonter nutriments et eau. Les voir au laboratoire, en

© ADOBE STOCK



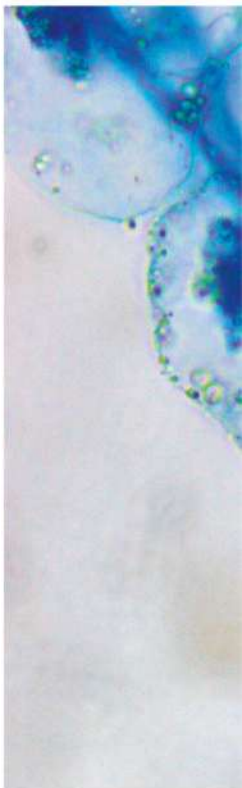
Un champignon marin, *Parengyodontium album (en vert),* colonise une particule de plastique *(en rouge).* En laboratoire, il peut dégrader du polyéthylène déjà fragilisé par les UV du soleil.

temps réel, comme on verrait circuler notre propre système sanguin, est passionnant, et cette étendue est tout simplement gigantesque. On sait que les plantes ont survécu des dizaines de millions d'années sans racines, qui sont une invention récente, en s'appuyant uniquement sur le champignon. Sur le plan structurel et sur leur rôle dans la régulation du climat, notre compréhension progresse ; mais les véritables interdépendances nous échappent encore. Saisir tout cela à l'échelle planétaire reste hors de notre portée.

M.-A.S. : Nous sommes aussi en symbiose avec eux sans y prêter attention. Nous cultivons des champignons, en Asie surtout, mais aussi des pleurotes ou des champignons de Paris en France, et c'est bon pour eux, qui n'ont jamais été aussi nombreux, et bon pour nous, qui les mangeons. Idem avec les levures du pain, du vin, de la bière, ou les champignons qui affinent les fromages. Chez les végétaux, ces relations sont très anciennes. Cette symbiose est aujourd'hui le cœur de la nutrition de 90 % des plantes : dans un sol ordinaire, non enrichi en phosphore et en azote, elles meurent sans ces champignons. Nous savons scientifiquement que c'est vital, mais nous ne faisons techniquement pas les gestes pour nous appuyer dessus. Le labour détruit les filaments fongiques, et les semis repartent de zéro sans profiter de tout le réseau déjà créé. Les coupes rases en forêt ne font pas mieux, en affamant les champignons, qui meurent. On vend même des kits d'inoculation : une étude récente montre qu'ils échouent dans 80 % des cas. La solution n'est pas d'acheter un inoculum, mais d'avoir les gestes protégeant les champignons déjà présents dans le sol. Au fond, nous ne sommes pas préparés aux solutions fondées sur la biodiversité : nous préférons la chimie, car on croit mieux la comprendre.

SVHS : Que peut-on attendre des champignons pour l'agriculture et la restauration des écosystèmes ?

M.-A.S. : Un très gros article paru dans *Nature**** en janvier dernier montrait que les pesticides affectent la diversité biologique des sols, et



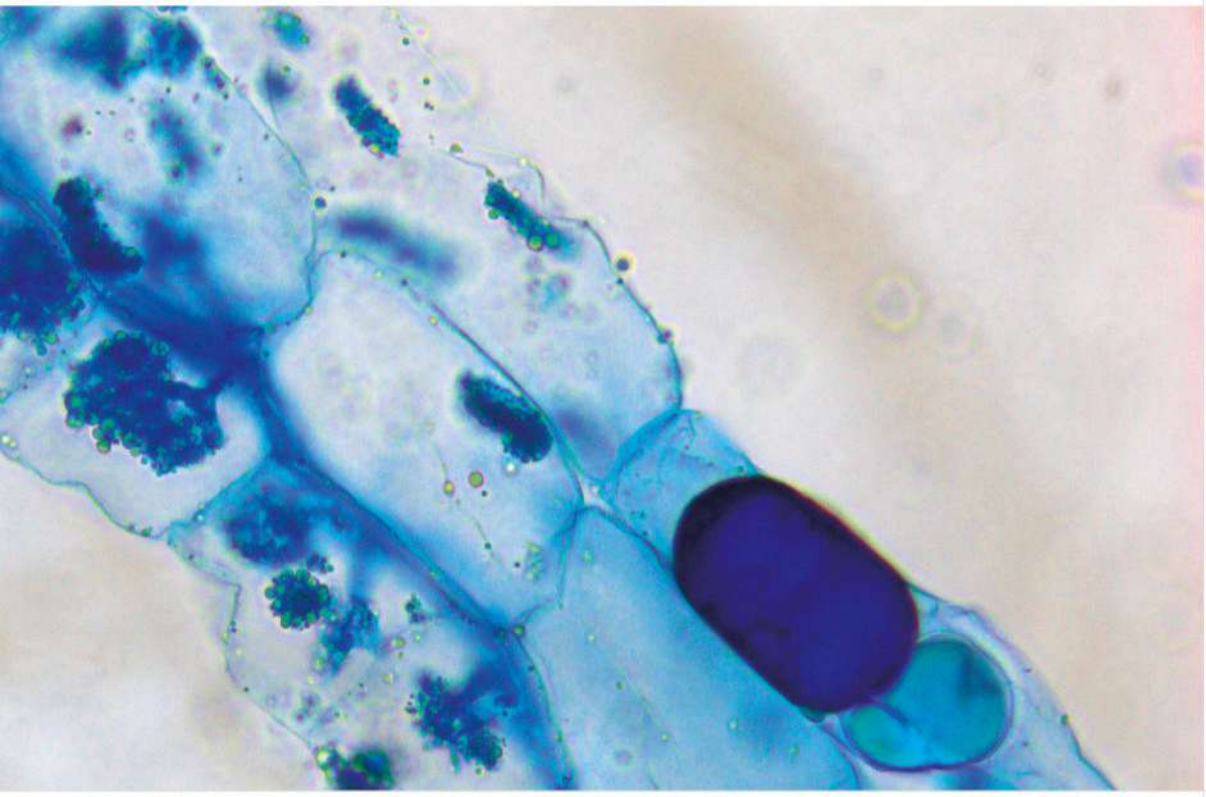
© ANNIKA VAKSMAA/NIOZ

« Les champignons sont essentiels à la restauration des écosystèmes en l'accélérant et en augmentant la biomasse »

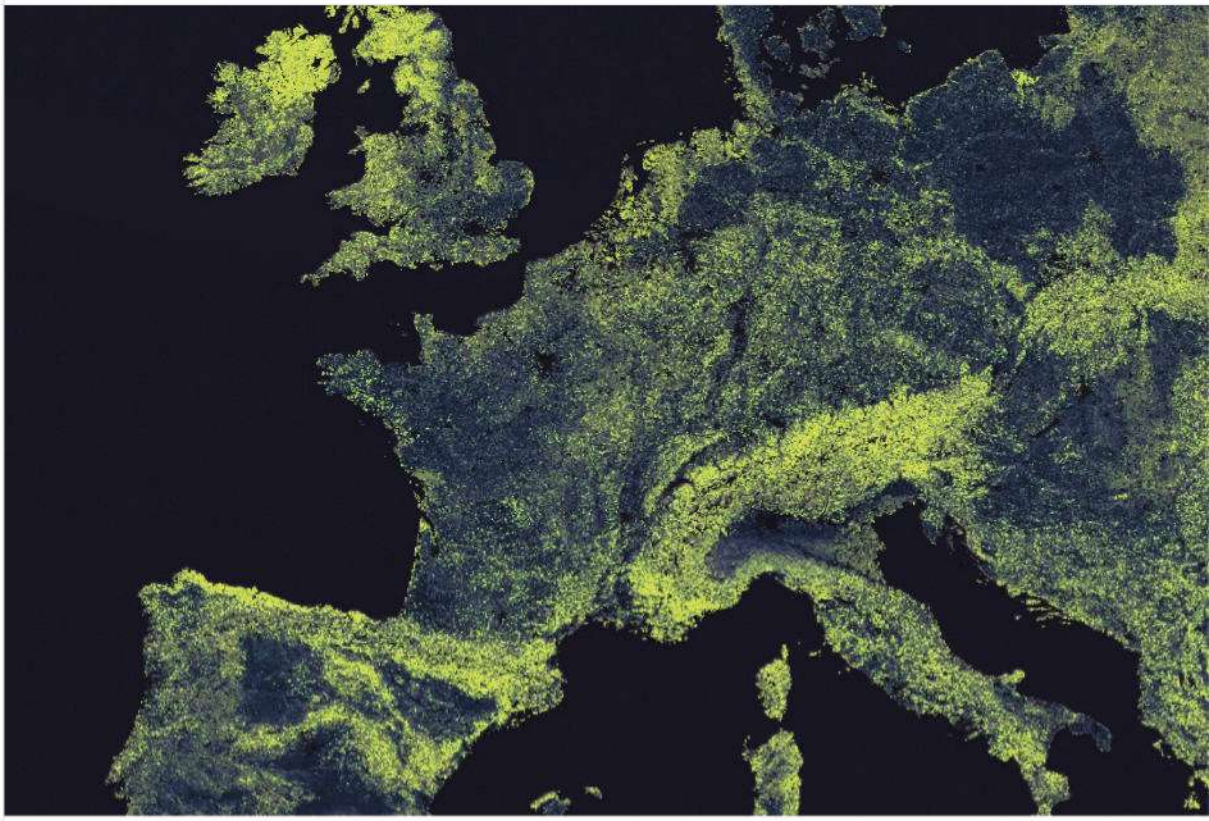
donc les fonctions de leurs microbes. L'un des groupes les plus atteints, ce sont les champignons mycorhiziens. Réduire les pesticides, c'est pouvoir compter davantage sur eux, donc mettre moins d'engrais, qui s'échappent et vont proliférer en algues vertes dans les eaux littorales.

T.K. : Quelques centaines d'études montrent que les champignons sont essentiels à la restauration des écosystèmes en l'accélérant et en augmentant la biomasse. Le goulet d'étranglement, c'est d'obtenir des communautés fongiques intactes sans prélever le sol sain qui existe encore : il faut apprendre à multiplier des champignons indigènes en bonne santé, car la prochaine avancée sera de restaurer les écosystèmes avec des plantes indigènes et leurs champignons indigènes, les seconds étant nécessaires aux premières. Même logique aux abords des cultures : un peu comme on aménage des bandes de plantes sauvages en lisière des parcelles pour les pollinisateurs, des refuges fongiques pourraient soutenir peu à peu les plantes cultivées. Sur la mycoremédiation, prometteuse mais balbutiante et sous-financée, j'espère voir de mon vivant de véritables projets à grande échelle. Mais je reste prudente : un champignon trop invasif lâché pour

Dans cette racine de *Macrotyloma uniflorum*, des mycorhizes arbusculaires montrent hyphes et arbuscules, dévoilant l'échange plante-champignon. En bas à droite, une vésicule.



© UNIVERSITY OF BURDWAN



Carte issue de l'atlas souterrain de SPUN, organisation scientifique qui cartographie les réseaux de champignons mycorhiziens, grâce à l'analyse de données provenant de 16 000 carottes de sol. En jaune, les régions où ces filaments seraient les plus denses. Par exemple, dans le Piémont italien, ils atteindraient 3,77 m/cm².

nettoyer des polluants, et qui s'échappe, poserait problème. La biodiversité fongique est une bibliothèque vivante de solutions à nos problèmes tels que la pollution, le dérèglement du climat ou l'agriculture. Si nous la perdons, nous serons en difficulté. Mieux vaut d'abord comprendre ce qui est là et comment travailler avec.

SVHS : Quelles leçons philosophiques pouvons-nous tirer des mycosciences ?

T.K. : Les champignons ont bousculé ma conception de l'organisme. J'étais formée à diviser le monde en piles d'organismes distincts. Notre compréhension change : les champignons ne sont pas seulement des choses, mais des verbes. Le monde naturel ressemble à un échafaudage vertigineux de connexions et d'échanges qui se réarrange en permanence. Les champignons nous forcent à passer d'une biologie des choses à une étude des processus et des comportements.

M.-A.S. : Beaucoup de pratiques traditionnelles de fermentation, avec les levures ou les *Aspergillus* en Orient (le koji, le saké), sont des coopérations : en cherchant des gestes qui marchent, nous avons recruté, puis domestiqué des champignons. Même sur votre peau, ce qui freine le staphylocoque doré, dont vous êtes très probablement porteur, ce sont de petites levures entravant son installation. Vous êtes vous-même la preuve que le biocontrôle par des champignons pourrait fonctionner.

SVHS : Décideurs et industriels partagent-ils cet optimisme ?

M.-A.S. : On ne fera pas émerger les solutions fondées sur le vivant sans une société qui commence à y croire. C'est pour ça que je me bats au sein de la fédération BioGée**, qui regroupe sociétés scientifiques et académies, pour plus d'enseignement des sciences du vivant, pour qu'une génération comprenne que les outils

© SPUN.EARTH

du vivant peuvent changer les choses, dans un monde microbien qu'elle ne ferait pas que subir.

T.K. : J'ai lu récemment une étude : pour 400 dollars dépensés pour la conservation des mammifères, les champignons n'en recevaient que 4 centimes. C'est le parent pauvre. Et au sein de ce parent pauvre, la recherche médicale reçoit sans doute le plus de financements, suivie de l'agriculture ; l'environnement et la conservation sont les plus délaissés.

> *« Notre démarche tient dans une question simple, mais profonde, que nous posons aux champignons parce qu'ils perçoivent le monde autrement : "Qu'est-ce que ça fait d'être toi ?" »*

SVHS : ***D'ici dix à vingt ans, quelle application de la mycoscience pourrait bouleverser notre société ?***

M.-A.S. : D'abord, les champignons continueront à nous fournir des outils pour améliorer notre santé. Et je pense qu'un meilleur pilotage des champignons nous aidera à mieux piloter les écosystèmes. Les pesticides d'aujourd'hui posent des problèmes environnementaux et sanitaires : il faut des solutions, et dans l'agroécologie, mieux maîtriser ces acteurs majeurs des écosystèmes est central. Le vivant reste un risque, les pires menaces sur les cultures venant souvent de champignons ; mais les méthodes fondées sur l'antagonisme et la compétition permettent de passer de l'éradication, qui marche mal et recourt à des molécules peu recommandables, à un biocontrôle qui n'éradique pas, mais a bien moins d'effets secondaires.

T.K. : Je crois beaucoup à la restauration et au réensauvagement fongiques. Nous venons de publier dans *Science* **** une étude sur l'étendue des réseaux mycorhiziens arbusculaires *[en symbiose avec une grande partie des espèces végétales terrestres, NDLR]*, et les chiffres nous ont stupéfaits : rien que dans les 15 premiers centimètres du sol, on trouverait 110 quadrillions (10^{24}) de kilomètres de réseau, soit près d'un milliard de fois la distance Terre-Soleil, et on ne parle même pas du réseau dans son ensemble ! Nous l'avons déduit grâce à l'harmonisation de données collectées partout dans le monde, qui ont nourri des modèles prédictifs, puis une carte mondiale : où ils prospèrent, où les densités sont faibles et quel est l'impact de l'agriculture. C'est pour ça que j'ai cofondé SPUN* : faire en sorte que ces données académiques parviennent aux décideurs, et que les gens se soucient de ce qu'ils ne voient pas. ▪

** Toby Kiers est professeure de biologie évolutive à l'université libre d'Amsterdam. Elle est directrice exécutive de SPUN (Society for the Protection of Underground Networks), organisation de recherche scientifique dédiée à la protection et la compréhension des champignons mycorhiziens. Elle est lauréate du Tyler Prize for Environmental Achievement 2026.*

*** Marc-André Selosse est professeur au MNHN et membre de l'Institut universitaire de France. Il est président de la fédération BioGée (biogee.org), qui vise à protéger et régénérer la biodiversité. Il est l'auteur de* De la biodiversité comme un humanisme, *éditions du Seuil, 2026.*

**** "Pesticide residues alter taxonomic and functional biodiversity in soils", J. Köninger* et al., Nature, *2026.*

***** "Global density and biomass of arbuscular mycorrhizal fungal networks", Justin Stewart* et al., Science, *2026.*

COMPRENDRE

Aleuria aurantia, ou pézize orangée. Ce champignon relativement commun, sans pied (stipe), comestible, a développé un sporophore (son appareil reproducteur) aux couleurs éclatantes.

© ADOBE STOCK

Que sont les champignons ?

Deux cent mille espèces de champignons ont été répertoriées à ce jour… Mais il en existerait plusieurs millions ! Les chercheurs se passionnent pour ce continent méconnu de la biologie. Le point… en 11 points PAR KHEIRA BETTAYEB

Ce ne sont pas des plantes

Pendant longtemps, les champignons ont été classés avec les végétaux "sans rameaux feuillés" – notamment en raison de leur apparente immobilité. Cependant, en 1959, l'écologue américain Robert Whittaker (1920-1980) les a isolés dans un règne à part : celui des *fungi* ("champignons" en latin). Cela sur la base de plusieurs caractéristiques qui les différencient clairement des plantes. Notamment, *"ils ne se nourrissent pas via le processus de photosynthèse"*, développe Philippe Silar, mycologue au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain à l'université Paris Cité, coauteur de *Les Champignons redécouverts* (éd. Belin). La photosynthèse *"permet aux plantes de fabriquer des sucres à partir du dioxyde de carbone de l'air, de l'eau absorbée par leur racine et de l'énergie solaire. Les champignons recourent pour leur part à une digestion extracorporelle appelée osmotrophie, basée sur la sécrétion d'enzymes digestives dégradant la matière organique présente dans leur environnement, rendant possible l'absorption des nutriments via des canaux moléculaires sur leurs cellules."*

© ADOBE STOCK

Ils sont proches des animaux

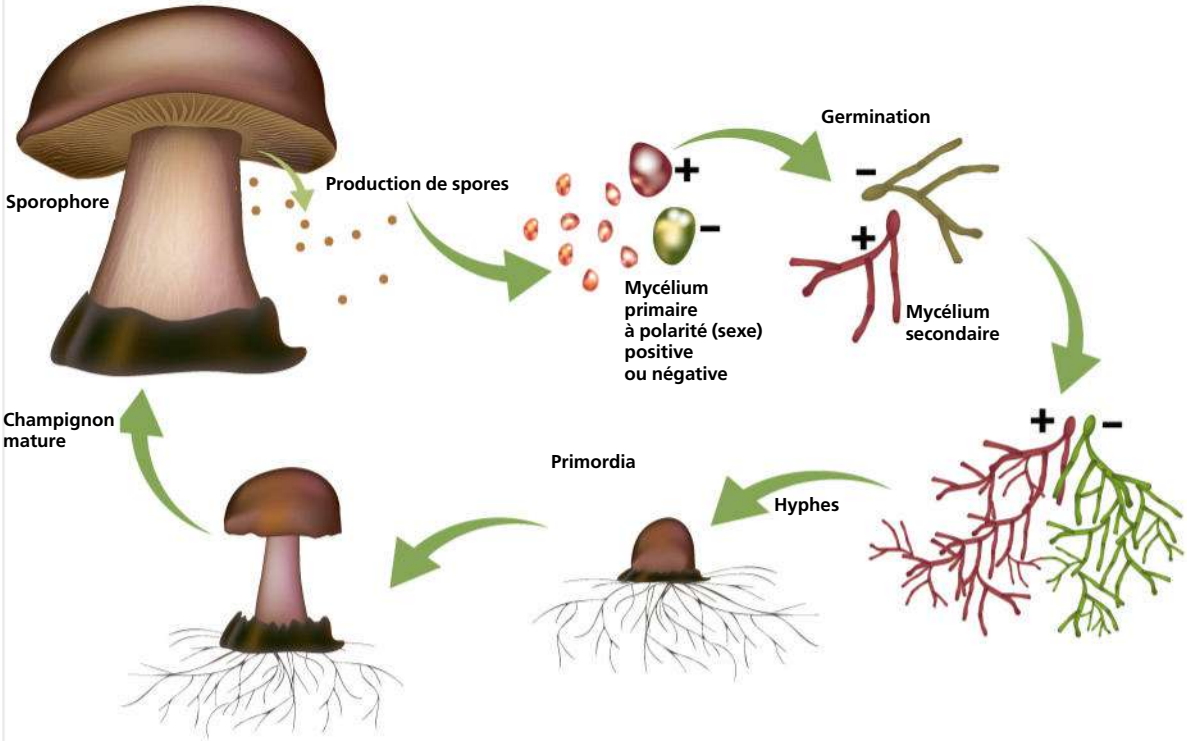
"La paroi de leurs cellules – l'enveloppe rigide qui protège et soutient celles-ci – ne contient pas de molécules de cellulose comme chez les végétaux, mais de la chitine, une molécule présente dans la carapace de certains animaux, tels les insectes ou les crustacés", commente Francis Martin, mycologue, directeur de recherche émérite à l'Inrae et auteur de *Tous les champignons portent-ils un chapeau ? 90 clés pour comprendre les champignons* (éd. Quae). De plus, *"comme les animaux, ils stockent le glucose (sucre) sous forme de glycogène"*, une grosse molécule très ramifiée constituée de nombreuses unités de glucose ; alors que *"les plantes stockent le glucose sous forme d'amidon"*, une molécule avec une structure moins complexe. Enfin, *"la comparaison de leur ADN avec ceux des animaux et des plantes montre qu'ils sont génétiquement plus proches des premiers"*.

À gauche : laccaire améthyste (*Laccaria amethystina*), un champignon comestible relativement courant dans l'hémisphère Nord. Ci-dessus : molécule de chitine, qui forme l'enveloppe rigide des champignons.

© SPL

Ce qu'on appelle "champignon" est un détail de leur anatomie

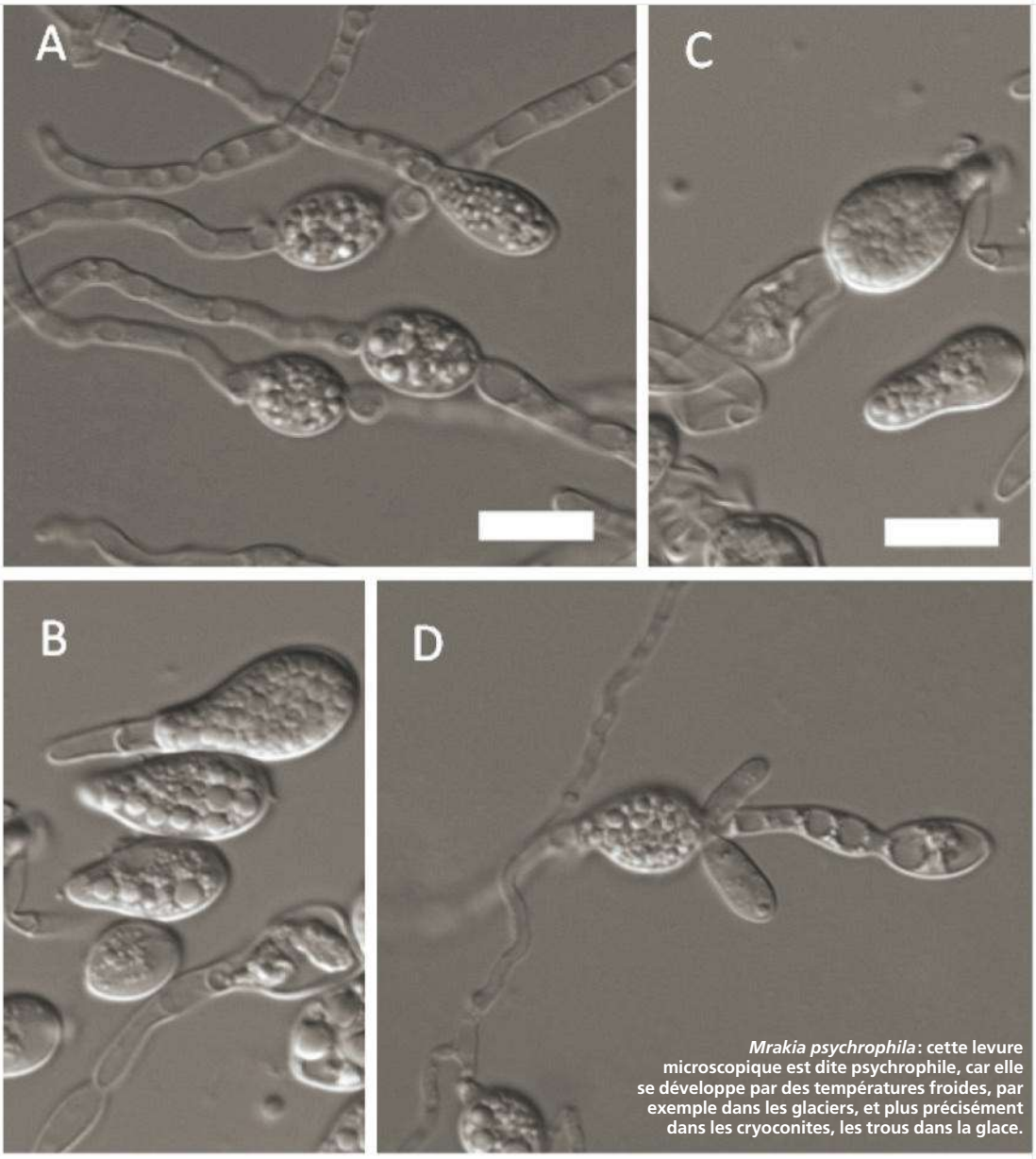
Cèpe, bolet, girolle… Pour les amateurs, ces champignons se limitent à leur pied et à leur chapeau. Or, il s'agit là seulement de leur appareil reproducteur, ou de "fructification", appelé sporophore *(voir dessin ci-dessous)*. Produisant leurs spores (cellules permettant la production de nouveaux individus), cette structure ne dure en général que quelques jours. En dessous se cache un élément pouvant survivre plus longtemps (plusieurs décennies ou plus) et beaucoup plus gros : le mycélium, un réseau souterrain de fins filaments enchevêtrés, appelés hyphes. Permettant au champignon d'explorer son environnement et d'y absorber des nutriments, cette structure peut s'étendre sur des superficies incroyables : selon Philippe Silar, *"le mycélium de l'espèce* Armillaria ostoyae, *un champignon commun brun doré, parasite des conifères, peut couvrir environ 9 km²"*.



Ils n'ont pas tous un chapeau

Ceux dotés de cet attribut appartiennent pour la plupart à un embranchement (groupe) particulier des *fungi* : les Basidiomycètes. Appelés souvent "champignon à chapeau", ceux-ci sont caractérisés par des spores formées à l'extrémité de cellules spécialisées dites "basides" –d'où leur nom–, dont l'ensemble constitue le fameux chapeau. Cependant, *"Ces champignons représentent seulement 30 % des espèces connues à ce jour,* souligne Francis Martin. *Les 70 % restants ne produisant pas cette excroissance."* C'est le cas, par exemple, de beaucoup de champignons du groupe des Ascomycètes, qui produisent leurs spores dans de petits sacs microscopiques appelés asques. Parmi eux : la truffe, ce célèbre (et très cher) champignon globuleux enfoui dans le sol *(ci-contre)*. *"Ce que l'on appelle communément 'truffe' correspond à la fructification de ce champignon souterrain. Et cette fructification appelée ascocarpe est l'équivalent du sporophore des Basidiomycètes… sauf qu'elle ne prend pas la forme d'un chapeau"*, explique Francis Martin.

© GETTY (x2)



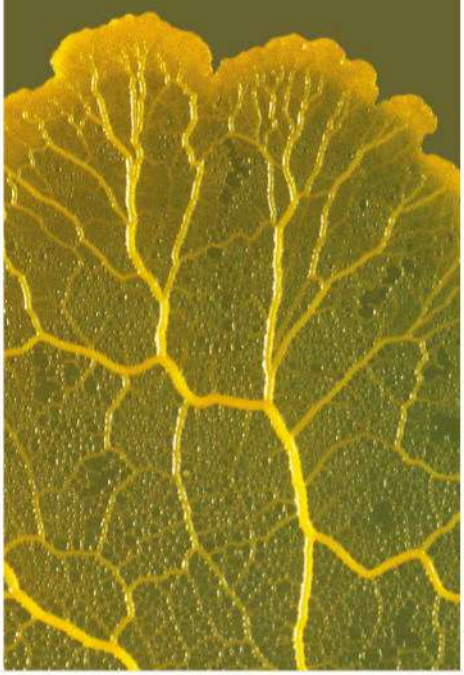
***Mrakia psychrophila*: cette levure microscopique est dite psychrophile, car elle se développe par des températures froides, par exemple dans les glaciers, et plus précisément dans les cryoconites, les trous dans la glace.**

La plupart sont invisibles

On distingue deux grands groupes de champignons. Ceux cités précédemment (Basidiomycètes et certains des Ascomycètes) correspondent à des macromycètes, ou macro-champignons, des champignons visibles à l'œil nu. Mais il existe aussi des micromycètes, ou micro-champignons, observables uniquement au microscope (excepté s'ils forment des colonies de milliers d'individus) et ne formant pas d'organes de fructification clairement visibles. *"À ce jour, de 70 % à 80 % des espèces de champignons connues sont des micromycètes, et comme on ne cesse d'en découvrir de nouveaux, ce taux devrait encore augmenter"*, relève Philippe Silar. Certains sont composés d'une seule cellule, comme la levure *Candida albicans* responsable d'infections fongiques chez l'humain. D'autres sont constitués de plusieurs cellules. C'est le cas notamment des moisissures que l'on voit se développer sur les fruits trop mûrs ou dans les logis humides et mal ventilés.

Le blob n'est pas un champignon

Popularisée en 2021 grâce à une expérience menée par l'astronaute français Thomas Pesquet et 4 500 élèves d'écoles primaires, de collèges et de lycées français, cette créature appelée aussi *Physarum polycephalum (ci-dessous)* a longtemps été confondue avec un champignon par les biologistes. Et pour cause : elle a l'apparence d'une "moisissure" jaune et visqueuse, vit dans les sous-bois, se reproduit grâce à des spores et forme des fructifications ressemblant à celles des champignons. Or, *"les analyses génétiques placent le blob loin des champignons, parmi les amibozoaires, des organismes eucaryotes à une seule cellule qui se déplace principalement par des pseudopodes, des prolongements rétractiles de leur cellule"*, assure Francis Martin. De plus, *"le blob ne forme pas un mycélium, mais une seule cellule géante contenant des milliers de noyaux. Il se nourrit en avalant ses proies, là où un champignon digère d'abord à l'extérieur avant d'absorber les nutriments. Enfin, il se déplace lentement vers sa nourriture, ce dont les champignons sont en général incapables"*. Il est à noter que le blob n'est pas non plus un animal, et ni une plante.

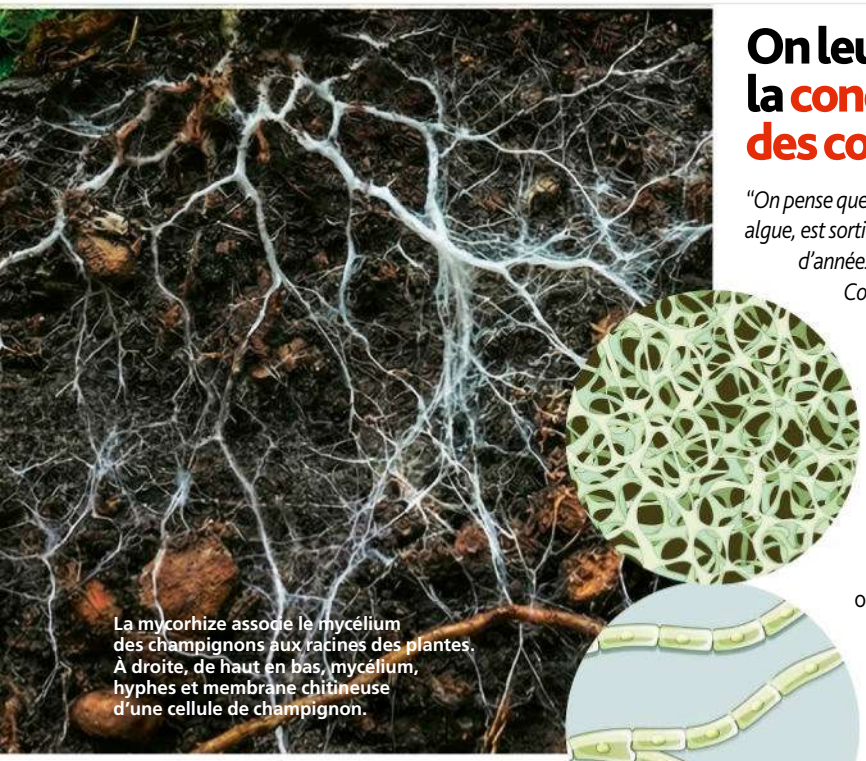


© SCOTT AMAZINE/SPL - ADOBE STOCK

"Au rythme actuel, il faudra plus de 4 500 ans pour inventorier toute cette multitude"

On les trouve partout

"Si la plupart vivent dans le sol, on en trouve aussi dans l'air, les océans, les eaux douces et les déserts. Il n'existe pas un seul écosystème sans champignons", indique Francis Martin. On en a même découvert sous le plancher océanique, *"jusqu'à 2 km de profondeur"*, précise Philippe Silar. De plus, il en existe aussi dans nos maisons : les moisissures qui se développent sur les murs humides sont des champignons. Idem pour les taches noires sur les joints de la salle de bains. *"On en trouve même sur les joints de machines à laver : une étude a montré qu'en quelques semaines, plus de 50 % des joints sont colonisés par ces organismes, qui y survivent en mangeant des résidus de savon"*, détaille Philippe Silar. Enfin, on en trouve aussi sur et dans les plantes et les animaux… y compris l'humain. *"Ils se développent sur nos ongles, notre cuir chevelu et dans nos différents microbiotes (cutané, buccal, intestinal, etc.). Ces derniers abritent de 300 à 400 espèces de champignons"*, souligne Francis Martin.



La mycorhize associe le mycélium des champignons aux racines des plantes. À droite, de haut en bas, mycélium, hyphes et membrane chitineuse d'une cellule de champignon.

Ils nourrissent 9 plantes sur 10

Arbres forestiers, plantes des champs, légumes du potager, arbustes… Plus de 90 % des plantes terrestres forment une association mutualiste avec les champignons, à savoir bénéfique pour les deux. Appelé "mycorhize", ce partenariat permet aux végétaux de leur fournir des molécules carbonées (sucres, graisses) qu'ils ne peuvent pas fabriquer ; et aux champignons d'apporter aux plantes des nutriments (phosphore, azote…) et de l'eau, grâce à leurs fins filaments pouvant prolonger les racines. *"Outre améliorer considérablement la nutrition de la plante, cette symbiose protège aussi le végétal des pathogènes du sol"*, souligne Marc-André Selosse, mycologue au Muséum national d'histoire naturelle, spécialiste des symbioses plantes-champignons. Concrètement, les filaments microscopiques du champignon peuvent pénétrer dans les cellules de la racine pour mieux s'y associer et ainsi former une "endomycorhize", ou mycorhize interne ; ou entourer simplement les racines et constituer ainsi une "ectomycorhize", ou mycorhize externe. *"Le premier type d'association concerne près de 80 % des plantes vasculaires, caractérisées par la présence de racines et de tiges ; et le second, surtout des arbres des forêts tempérées et boréales, tels le chêne, l'épicéa ou le bouleau"*, détaille Marc-André Selosse.

On leur doit la conquête des continents

"On pense que l'ancêtre des plantes actuelles, une algue, est sorti de l'eau il y a environ 450 millions d'années, raconte Marc-André Selosse. *Comme il n'avait pas de racines, il était incapable de puiser de l'eau et des minéraux dans le sol. Heureusement, il a pu établir des mycorhizes avec des champignons, ce qui lui a permis de survivre hors de l'eau."* En rendant possible cet événement appelé "terrestrialisation", les champignons ont contribué à changer à jamais le visage de notre planète. Ainsi, ils ont permis indirectement la sortie de l'eau des animaux vertébrés, qui se nourrissent des plantes. Ils ont aussi mené à l'apparition d'un sol fertile, épais et profond, capable de capturer plus d'eau. Cela, grâce à la dégradation de la matière végétale et animale. De plus, ils ont contribué à la formation de l'atmosphère, notamment via la capture du CO_2 par les plantes. Enfin, ils ont conduit au refroidissement de l'atmosphère, entre autres grâce à la diminution du CO_2, un gaz à effet de serre. À partir de là, c'est toute la vie végétale et animale actuelle, diversifiée et prolifique, qui a pu se développer !

> *"Ils recourent à une digestion extracorporelle, que l'on appelle osmotrophie"*

© ABOBE STOCK GETTY-

Pas de vie ni de vin sans champignons

En formant des mycorhizes et en rendant les sols fertiles, les champignons favorisent la pousse des plantes et, ainsi, augmentent la variété des formes vivantes sur Terre. *"Même les champignons parasites de plantes contribuent à cette biodiversité"*, relève Marc-André Selosse. Par exemple, *"en s'attaquant aux conifères, l'armillaire contribue à la formation de clairières dans les forêts de conifères ; ce qui laisse de la place pour la pousse d'espèces aimant la lumière, non parasitées par ce champignon, comme l'érable et le bouleau"*. De même, *"certains champignons, notamment des Ascomycètes, sont des parasites d'insectes et limitent ainsi activement les populations de ces animaux"*. Mais ce n'est pas tout ! Les champignons sont également importants pour l'alimentation, avec par exemple les levures utilisées en boulangerie ou pour la fabrication du vin, ou les moisissures comme *Penicillium roqueforti (ci-contre) et Penicillium camemberti*, permettant la production du roquefort et du camembert. Ils sont incontournables en gastronomie, avec les champignons comestibles comme les morilles et les truffes. Enfin, ils sont utiles en médecine, avec, en exemple emblématique, le champignon *Penicillium*, producteur de l'antibiotique pénicilline.

> *« Ils se développent sur nos ongles, notre cuir chevelu et dans nos microbiotes, lesquels abritent de 300 à 400 espèces de champignons »*

La plupart n'ont pas encore été découverts

Répertorier les champignons microscopiques était très difficile jusqu'au début des années 2000. Pendant longtemps, leur identification était en effet basée sur leur mise en culture en laboratoire, puis leur étude moléculaire. Or, comment mettre en culture des spécimens dont l'existence est insoupçonnée ? Heureusement, les choses se sont accélérées depuis la fin des années 2000, grâce à l'arrivée des séquenceurs à très haut débit, capables de décrypter un génome entier en quelques heures. *"Désormais, il est possible de les détecter seulement en analysant l'ADN présent dans des échantillons de sol, d'eau ou d'air, prélevés dans différents milieux"*, se réjouit David Navarro, directeur adjoint du Centre international de ressources microbiennes-champignons filamenteux (CIRM-CF), qui travaille à la collecte, à l'isolement, à la caractérisation et à la conservation de champignons filamenteux (hors levures). Selon les chercheurs, il existerait plusieurs millions d'espèces de champignons sur notre planète ; or seules 200 000 ont été répertoriées à ce jour. *"Au rythme actuel,* estime Francis Martin, *il faudra plus de 4 500 ans pour inventorier toute cette multitude."*

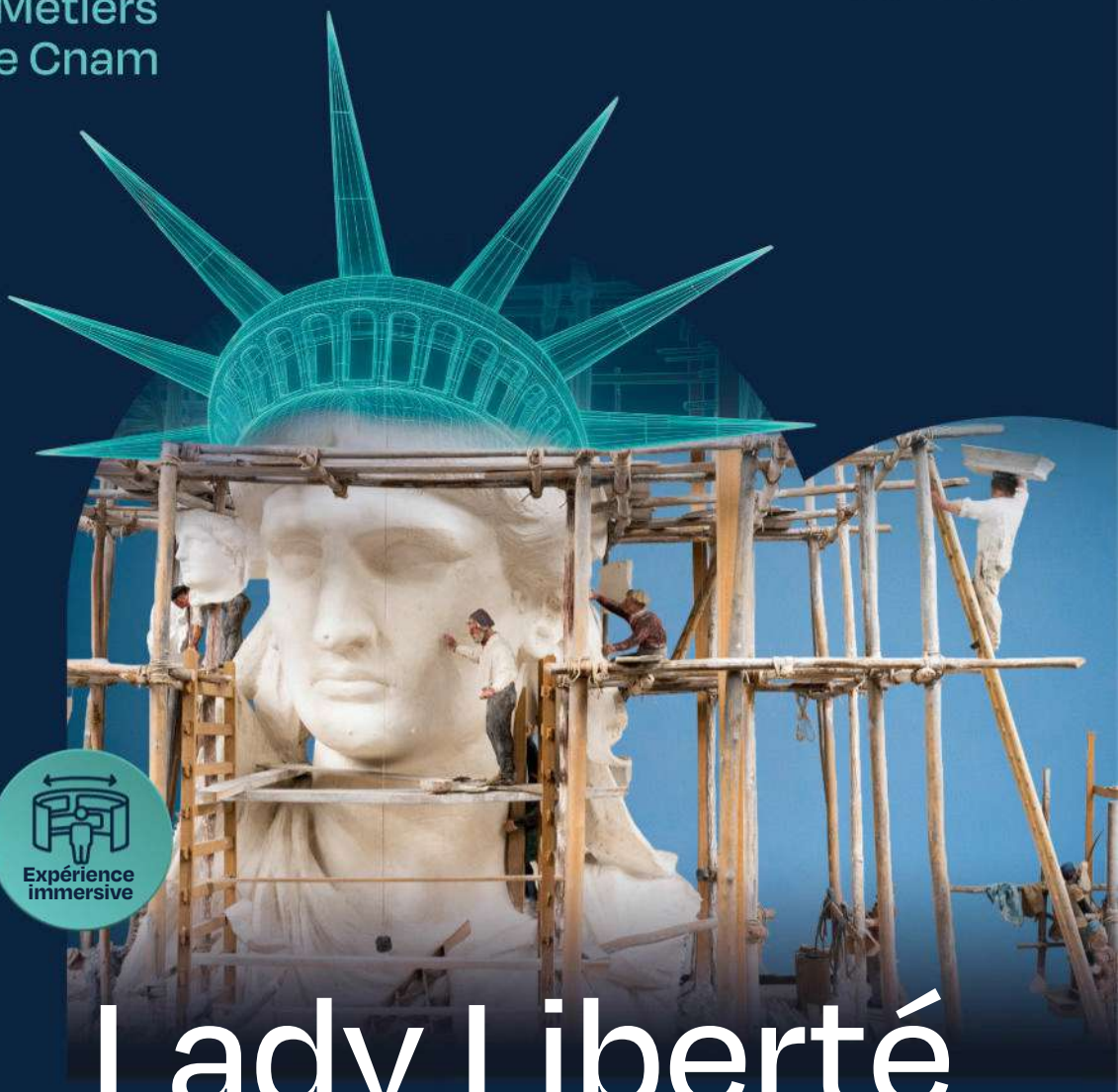
© ADOBE STOCK

Musée des Arts et Métiers › Le Cnam

60 rue Réaumur
75003 Paris

arts-et-metiers.net

Co-production



Expérience immersive

Lady Liberté

De la sueur, de l'audace, du génie

› 22.09.26
01.08.27

expo muam

LIBRE © Musée des arts et métiers - Photo : Franck Bohbot

1 milliard d'années avant la girolle

Les champignons fossiles apportent bien plus de questions que de réponses. Quand sont-ils apparus ? Et, surtout, quel étrange pacte ont-ils passé avec les plantes ? PAR NATACHA SCHEIDHAUER

Le Silurien, de -444 à -416 millions d'années, voit les plantes conquérir la terre ferme. *Prototaxites (au second plan)*, longtemps classé parmi les arbres, puis les champignons, serait en fait un lichen géant.

Les Mycètes *(Mycota)*, ces organismes qui se déploient sous terre à l'exception de leur fructification, le champignon, sont parés de multiples pouvoirs. Par exemple, ils se voient attribuer le rôle d'instigateurs de la "sortie des eaux" des plantes, ce moment où elles partent à la conquête des continents et que les scientifiques nomment "terrestrialisation". Les Mycètes y ont à coup sûr joué un rôle. Ils sont bel et bien présents lors de cette étape clé, vers 500 millions d'années. *"Ils pourraient même être présents sur la terre ferme depuis un milliard d'années"*, explique Corentin Loron, paléobiologiste à l'université Trinity College de Dublin et codécouvreur en 2019 d'*Ourasphaira giraldae*. Conservé dans l'Arctique canadien, ce minuscule fossile contient de la chitine, un composé présent dans les parois cellulaires des Mycètes, et pourrait ainsi repousser la chronologie de leur terrestrialisation. *"Même si, dans ce monde si différent de celui que nous connaissons, il est difficile de trouver des preuves pour identifier les organismes avec certitude"*, précise le chercheur. *"Nous cherchons encore à établir lesquels étaient contemporains du sol primitif, il y a un milliard d'années, et dans quel type d'environnement ils vivaient"*, confirme Christine Strullu-Derrien, paléobotaniste et paléomycologue au Muséum national d'histoire naturelle (Paris) et au Natural History Museum (Londres). Pour remonter la piste, les chercheurs peuvent s'appuyer sur les archives fossiles et les données géochimiques, mais aussi sur les progrès de l'imagerie, notamment les microscopes à balayage laser qui permettent des acquisitions en 3D.

Les spécialistes de l'origine des Mycètes sont habitués aux surprises que leur procure leur objet d'étude. Rien que leur classification reste incertaine. Longtemps considérés comme cousins des végétaux, les Mycètes voisinaient avec les mousses, les algues, les fougères… jusqu'en 1969, où les progrès de la biologie moléculaire en ont fait un règne à part

© RICHARD JONES/SPL

***Marchantia polymorpha*. Les Marchantiophytes, des plantes extrêmement archaïques, ont gardé la trace d'un transfert de gènes intervenu entre des plantes et des champignons préhistoriques.**

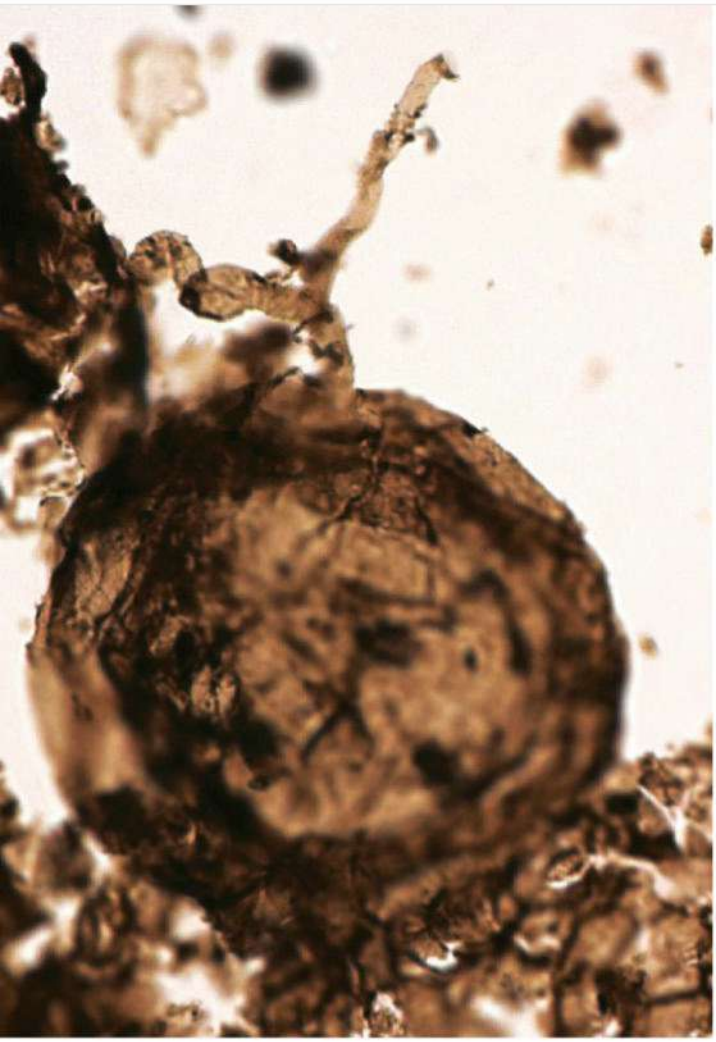
entière, celui des *Fungi* (ou Mycètes). Bien plus proche des animaux que des plantes, il regroupe principalement les champignons dotés d'un pied et d'un chapeau, les moisissures et les levures. Un règne récemment identifié, donc, et encore largement inconnu.

PREMIERS GÉANTS TERRESTRES

Certains ont tenté de faire entrer un individu supplémentaire dans la famille. Décrit pour la première fois en 1859 à partir d'un spécimen trouvé dans les gisements dévoniens canadiens et capable d'atteindre huit mètres de haut, *Prototaxites* fait partie des premiers géants terrestres. D'abord considéré comme un arbre, son anatomie et des preuves isotopiques qu'il se nourrit en décomposant de la matière organique l'ont ensuite classé parmi les Mycètes. *"Mais plusieurs raisons poussent aujourd'hui à faire machine arrière"*, démontre Corentin Loron dans une étude parue début 2026 dans *Science Advances*. Celle-ci présente un spécimen du chert de Rhynie, en Écosse, un écosystème du Dévonien particulièrement bien préservé. *"Sa structure interne présente des ramifications très fines, inconnues dans ce règne, tandis que sa composition moléculaire ne montre pas les traces de fossilisation habituelles des groupes de champignons existants ou éteints."* En analysant l'environnement des fossiles, le chercheur a aussi montré l'absence de biomarqueurs caractéristiques des Mycètes. Exit, donc *Prototaxites* le champignon. Des hypothèses l'envisagent maintenant comme appartenant à une lignée d'eucaryotes inédite et aujourd'hui éteinte… ou peut-être comme un lichen.

« Un transfert de gènes se serait produit entre un champignon et l'ancêtre commun aux plantes voilà un demi-milliard d'années »

© DR. MORLEY READ/SPL



***Ourasphaira giraldae*. Ce fossile découvert dans l'Arctique canadien recèle de la chitine, comme les champignons. Il pourrait prouver que ces derniers se sont adaptés à la vie terrestre avant les plantes.**

Les scientifiques s'interrogent également sur l'existence d'un "pacte biologique" qu'une catégorie de Mycètes (cèpes, amanite phalloïde, Lactaires, Cortinaires, etc.) aurait noué avec les plantes voilà 500 millions d'années au moins. Alors qu'on a longtemps pensé que les premières plantes, issues d'une lignée d'algues sorties des eaux douces après les bactéries, avaient colonisé les terres par elles-mêmes pour donner vie à tous les végétaux de notre planète, on privilégie depuis les années 1980 une autre hypothèse. Encore une fois grâce au chert écossais, où la roche renferme certains des plus anciens fossiles terrestres les mieux conservés, parmi lesquels des plantes et des champignons primitifs. Précieuse photographie de la vie sur Terre à –407 millions d'années, le site offre des preuves de la mycorhize, cette relation symbiotique toujours en vigueur aujourd'hui. C'est elle qui aurait permis aux plantes de l'époque, dépourvues de feuilles pour réaliser la photosynthèse et de racines pour puiser dans les sols naissants (ou primitifs), de s'adapter pour donner naissance à de nouveaux écosystèmes.

UNE SYMBIOSE TRÈS ANCIENNE

Cette hypothèse est renforcée par les travaux de Pierre-Marc Delaux, spécialiste de l'évolution des interactions plantes-microorganismes au Laboratoire de recherche en sciences végétales, à Toulouse. En démontrant dans une étude datée de 2021 *(Science)* qu'un gène connu pour son rôle dans la symbiose plante-champignon actuelle *"était à l'œuvre dans les deux grandes branches de plantes terrestres* [avec racines et sans, NDLR]", l'équipe en a conclu *"que leur ancêtre commun, à 450 millions d'années, le possédait également"* : la symbiose pouvait dès lors exister. Dans une étude publiée en février 2025 dans *Nature Genetics*, les chercheurs ont analysé le patrimoine génétique de 133 spécimens de *Marchantia polymorpha* – une plante appréciée dans les laboratoires pour sa large répartition, sa facilité de culture et de croisement. Ils ont ainsi pu confirmer *"la trace d'un transfert de gènes qui se serait produit il y a un demi-milliard d'années entre un champignon et l'ancêtre commun aux plantes"*…

Alors, champions, les champignons ? Depuis les années 1980, ils ont en tout cas détrôné les plantes comme seules responsables de la terrestrialisation. Mais des chercheurs pondèrent. *"Plutôt que de permettre aux plantes de coloniser les continents, les Mycètes pourraient leur avoir permis de se diversifier"*, explique Christine Strullu-Derrien. Une hypothèse qu'elle argumente dans une étude en cours de publication : *"Nos derniers travaux suggèrent en tout cas que leur relation était plus complexe et que le récit de l'une des transitions les plus décisives de l'histoire de la vie sur Terre demande à être plus nuancé."* Assurément, l'histoire évolutive des Mycètes nous réserve encore bien des surprises. ▪

© LORON & AL

Mycena chlorophos

DIVISION : BASIDIOMYCÈTES
CLASSE : AGARICOMYCÈTES
FAMILLE : MYCÉNACÉES

Près d'une centaine d'espèces de champignons bioluminescents sont connues à travers le monde. La lumière verte (de 520 nm à 530 nm) issue de la bioluminescence est le résultat de l'oxydation d'un substrat, la luciférine, par une enzyme, la luciférase, en présence d'oxygène et d'adénosine triphosphate (ATP). *M. chlorophos* est l'un des plus lumineux, dans les conditions optimales d'humidité et de température, et en fonction du substrat sur lequel il pousse (bois mort en forêt humide, tropicale ou subtropicale). Ce champignon est très étudié et des applications en biotechnologies se développent, comme le suivi des tumeurs, permettant d'éviter les marqueurs radioactifs.

Trésors d'un monde caché

De toutes formes, de toutes tailles, de toutes couleurs, les champignons font preuve d'une diversité et d'une adaptabilité hors du commun. Revue de détail.

PAR PASCALE-EMMANUELLE LAPERNAT-GUILHAUMON

© GFC COLLECTION/ALAMY STOCK PHOTO/HEMIS.FR

Chlorociboria aeruginascens

D : ASCOMYCÈTES
C : LEOTIOMYCETES
F : CHLOROCIBORIACEAE

Ce lignicole saprophyte se développe sur le bois mort de certains arbres dans les forêts tempérées. Le mycélium colonise les troncs et y produit un colorant turquoise, la xylindéine, qui teinte le bois de façon persistante et qui a été utilisé depuis la Renaissance en marqueterie ou en ébénisterie. Les fructifications en forme de coupelle de ce champignon ne dépassent pas 2 cm. Elles sont appelées apothécie ou pézize, d'où son surnom de pézize turquoise, mais ne sont pas toujours visibles. La xylindéine est étudiée pour ses vertus algicides et ses propriétés anticancéreuses ou antibiotiques par l'industrie des colorants, ou encore en optoélectronique comme composé semi-conducteur (dans les cellules photovoltaïques organiques, par exemple) grâce à sa forte photostabilité.

© DR. KEITH WHEELER/SPL

Pruinomycena subcyanocephala

D: BASIDIOMYCÈTES
C: AGARICOMYCÈTES
F: HEMIMYCENACEAE

Ce champignon est le plus petit connu des macrochampignons : environ 1 mm. Il a été observé pour la première fois dans les forêts tropicales de Taïwan et décrit en 2019. Peu d'observations sont recensées : le site inaturalist.org fait état de 30 observations, dont 3 sur la côte est de l'Australie. Ce petit champignon au chapeau bleu est lignicole. Il est susceptible de contenir de la muscarine ; substance toxique contenue dans l'amanite tue-mouches, un proche cousin. Sa répartition très limitée et sa rareté en font une espèce particulièrement fragile face aux activités humaines (déforestation, réchauffement climatique).

Hydnellum peckii

D: BASIDIOMYCÈTES
C: AGARICOMYCÈTES
F: BANKERACEAE

Son nom vient de sa morphologie hydnoïde : la face inférieure – hyménium – est hérissée d'aiguillons caractéristiques. De forme irrégulière (de 2 cm à 15 cm) et de couleur blanchâtre quand il est jeune, ce champignon connu sous le nom de "dent qui saigne" exsude des gouttelettes rouge sang – surtout en période humide – aux qualités proches de l'héparine, un anticoagulant. La substance produite s'appelle l'atromentine. En vieillissant, le champignon devient plus foncé, de rosé à brun. Il se développe dans les forêts de conifères en Europe ou Amérique du Nord, à sol acide. Une forte symbiose le lie à son arbre hôte avec qui il échange des nutriments.

Clathrus archeri

D: BASIDIOMYCÈTES
C: AGARICOMYCÈTES
F: PHALLACEAE

Parmi ses noms vernaculaires, l'anthurus d'Archer est bien décrit par "doigts du diable", lesquels mesurent jusqu'à 20 cm. Évoquant une créature de science-fiction, ce champignon appartient à l'ordre des Phallales, caractérisé par leur odeur putride et leurs formes atypiques. Il se développe à partir d'une forme d'œuf blanc (la volve, de 3 cm à 8 cm), d'où sortent les bras (de 4 à 8) : le sporophore, de couleur rouge. Ces bras sont recouverts de gleba, une substance gluante. L'odeur attire les insectes nécrophages, qui disséminent les spores collées par la gleba : on parle alors de zoochorie. Considéré comme une espèce parfois envahissante en Europe, il peuple les forêts de feuillus et conifères, mais aussi les plaines. Il est saprophyte : il se nourrit en décomposant la matière organique morte, comme la cellulose et la lignine du bois.

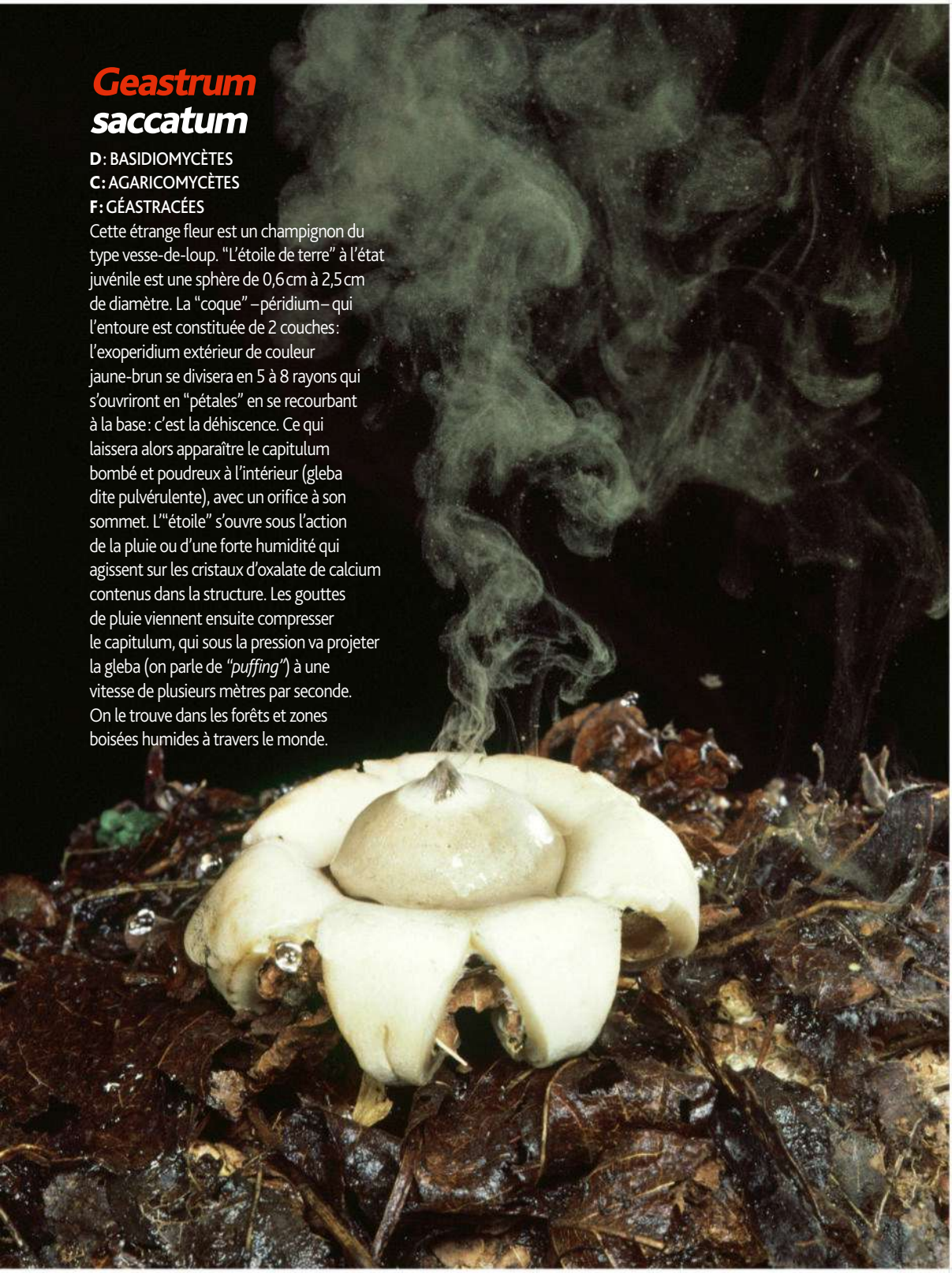
© ABOBE STOCK

Hericium erinaceus

D: BASIDIOMYCÈTES
C: AGARICOMYCÈTES
F: HERICIACEAE

L'hydne hérisson est connu du grand public sous le nom de "crinière du lion". Saprotrophe, il est plutôt répandu dans les forêts de l'hémisphère Nord. Facilement cultivable, il fait l'objet de nombreuses recherches pour ses vertus sur le système nerveux, grâce à l'action de molécules comme l'héricénone (dans le sporophore), benzaldéhyde au rôle neuroprotecteur –entre autres qualités– et l'éricinine (dans le mycélium), un diterpénoïde qui stimule le facteur de croissance nerveuse. Les polysaccharides de ce champignon ont par ailleurs montré des propriétés multiples : anti-ulcère gastrique, antitumoral, immunomodulation, hépatoprotection, etc.

© ABOBE STOCK



Geastrum saccatum

D: BASIDIOMYCÈTES
C: AGARICOMYCÈTES
F: GÉASTRACÉES

Cette étrange fleur est un champignon du type vesse-de-loup. "L'étoile de terre" à l'état juvénile est une sphère de 0,6 cm à 2,5 cm de diamètre. La "coque" –péridium– qui l'entoure est constituée de 2 couches: l'exoperidium extérieur de couleur jaune-brun se divisera en 5 à 8 rayons qui s'ouvriront en "pétales" en se recourbant à la base: c'est la déhiscence. Ce qui laissera alors apparaître le capitulum bombé et poudreux à l'intérieur (gleba dite pulvérulente), avec un orifice à son sommet. L'"étoile" s'ouvre sous l'action de la pluie ou d'une forte humidité qui agissent sur les cristaux d'oxalate de calcium contenus dans la structure. Les gouttes de pluie viennent ensuite compresser le capitulum, qui sous la pression va projeter la gleba (on parle de *"puffing"*) à une vitesse de plusieurs mètres par seconde. On le trouve dans les forêts et zones boisées humides à travers le monde.

© JEFF LEPORE/SPL

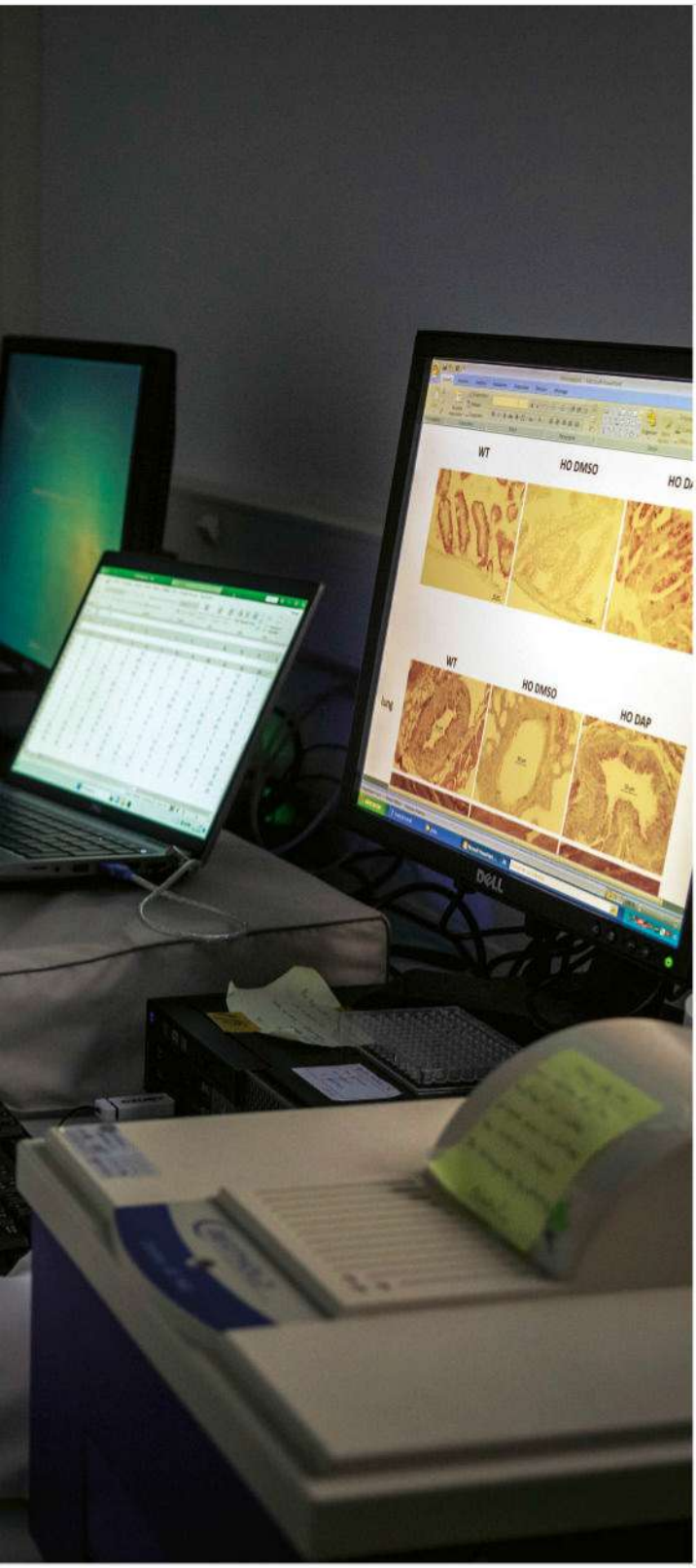
SOIGNER

Ces sporophores de shiitakés poussent sur des drêches, des résidus de brassage de l'orge récupérés lors de la fabrication de la bière à Bruxelles.

© ARNE IMMANUEL BÄNSCH/DPA/PHOTONONSTOP

Fabrice Lejeune, biologiste moléculaire à l'Inserm, analyse des coupes de poumons et d'intestins de souris pour étudier d'éventuelles anomalies dans l'expression de la protéine CFTR. Des composés de *Paralepista flaccida,* un champignon comestible, pourraient réparer ces mutations, dites non-sens, responsables de la mucoviscidose.

Une chance pour la médecine du futur



Les champignons produisent de nombreux composés intéressants pour la recherche médicale. En France et à l'étranger, des équipes de scientifiques explorent cette source de traitements potentiels.

PAR KHEIRA BETTAYEB

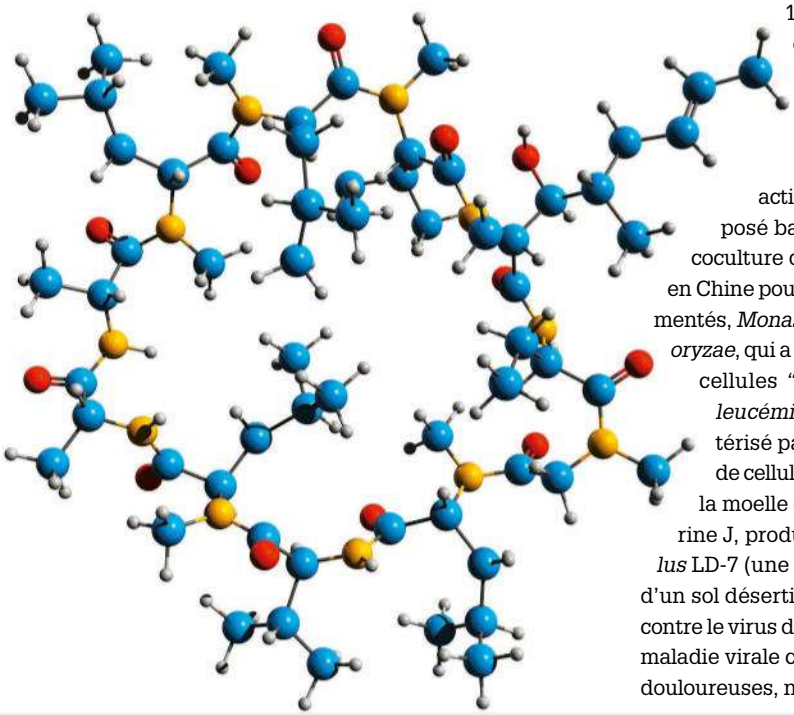
Cancers, infections, dépression, allergies, maladies auto-immunes telles que le lupus ou la polyarthrite rhumatoïde, maladies génétiques rares… De nombreuses pathologies nécessitent des traitements capables d'améliorer la qualité de vie des patients ou de les guérir. Pour identifier des principes actifs innovants, les chercheurs se tournent aujourd'hui vers une source de nouveaux médicaments prometteuse : les champignons. *"Constituant un réservoir unique, encore largement sous-exploité, ces organismes renferment de nombreuses molécules potentiellement thérapeutiques, aux structures et aux activités très diversifiées"*, relève Bruno Donatini, gastro-entérologue à Reims, auteur *de Champignons comestibles. Leurs vertus pour votre santé* (Éditions du Dauphin, 2019).

De fait, les champignons, notamment les espèces microscopiques de type moisissure, ont déjà mené à plusieurs médicaments désormais très largement utilisés. Parmi eux : la pénicilline produite par la moisissure du sol *Penicillium notatum*, qui a révolutionné la lutte contre les infections bactériennes ; les statines lovastatine et simvastatine, sécrétées par *Aspergillus terreus* et prescrites pour réduire le mauvais cholestérol ("LDL") ; la ciclosporine produite par *Tolypocladium inflatum* et utilisée depuis les années 1980 pour éviter le rejet de greffes.

© FRANCOIS GUENET/DIVERGENCE

> *Ces organismes renferment de nombreuses molécules potentiellement thérapeutiques, aux structures et aux activités très diversifiées*

À l'avenir, d'autres traitements d'origine fongique pourraient venir étoffer la boîte à outils des médecins. Car depuis quelques décennies, la recherche a mis en lumière plusieurs centaines de composés prometteurs chez ces organismes. *"La recherche sur les champignons utilisables en médecine n'a jamais progressé aussi rapidement, témoignant d'avancées sans précédent dans l'identification et la caractérisation de leurs composés bioactifs"*, constate Katarzyna Kała, de l'université Jagellonne de Cracovie, en Pologne, dans un article paru fin 2025 dans la revue *Pharmaceuticals*. À l'origine de cette accélération : la découverte de nouvelles espèces microscopiques et l'intérêt grandissant de la médecine moderne pour ces organismes. *"L'exploration d'espèces fongiques encore peu étudiées, notamment les champignons marins et endophytes* [vivant à l'intérieur des tissus d'une plante sans provoquer de maladie apparente, NDLR], *pourrait révéler de nouvelles structures chimiques aux profils pharmacologiques uniques"*, souligne Katarzyna Kała.



Structure chimique de la ciclosporine, une molécule utilisée comme médicament immuno-suppresseur, après une greffe par exemple, ou dans certaines maladies auto-immunes.

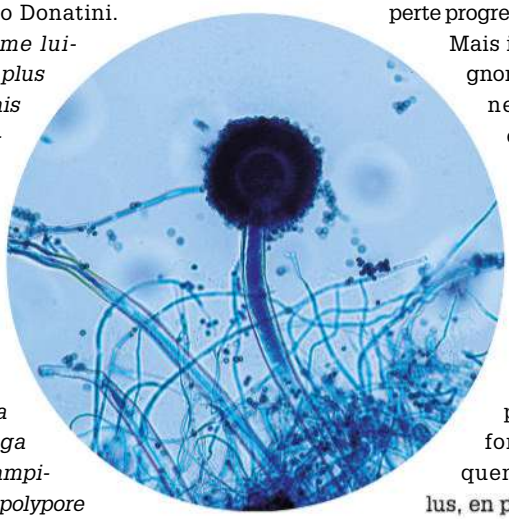
© SENIYA-OMEGA/ALAMY/HEMIS.FR

907 NOUVEAUX MÉTABOLITES EN 2024

Si la recherche dans le domaine est si prolifique, c'est aussi grâce au développement à partir des années 2000 d'une approche puissante : la métabolomique non ciblée à haut débit. S'appuyant sur des techniques d'analyse high-tech, comme la chromatographie en phase liquide et la spectrométrie de masse, cette méthode permet d'étudier l'ensemble des métabolites, à savoir des petites molécules comme les sucres, les acides gras ou les acides aminés, présentes dans une cellule, un fluide biologique (sang, urine…) ou un organisme.

Lors d'une recherche publiée en 2025 dans *Mycology*, des scientifiques chinois de l'Institut de microbiologie de Pékin ont analysé 154 études parues en 2024 et ont conclu que, pendant cette seule année, pas moins de 907 nouvelles substances de ce type ont été identifiées. Parmi celles présentant "des activités remarquables" : le composé baptisé monaspin B, issu de la coculture de deux moisissures utilisées en Chine pour la production d'aliments fermentés, *Monascus purpureus* et *Aspergillus oryzae*, qui a démontré lors de tests sur des cellules *"une puissante activité anti-leucémie"*, un cancer du sang caractérisé par la prolifération incontrôlée de cellules sanguines immatures dans la moelle osseuse. Ou le composé talarine J, produit par *Talaromyces pinophilus* LD-7 (une espèce microscopique isolée d'un sol désertique), qui s'est avéré efficace contre le virus de la stomatite vésiculaire, une maladie virale caractérisée par des vésicules douloureuses, notamment dans la bouche.

La plupart des composés intéressants listés dans cette recherche dérivent de champignons microscopiques associés à des plantes (38 %) et des souches marines (30 %). Cependant, les "champignons" classiques, avec un pied et un chapeau, ne sont pas en reste ! Un groupe intéresse particulièrement la recherche médicale : *"les espèces utilisées depuis des millénaires en médecine traditionnelle asiatique, notamment chinoise et japonaise"*, souligne Bruno Donatini. Parmi elles : *"le ganoderme luisant* (Ganoderma lucidum), *plus connu sous son nom japonais de* reishi *; le champignon crinière de lion ou* Lion's mane *en anglais* (Hericium erinaceus), *reconnaissable à ses longs filaments blancs semblables à une crinière de félin ; le champignon queue de dinde* (Coriolus versicolor), *dont la forme et les couleurs rappellent la queue de la dinde ; le chaga* (Inonotus obliquus), *un champignon parasite du bouleau ; le polypore en touffe* (Grifola frondosa), *ou* maitaké *en japonais"*, liste le médecin.



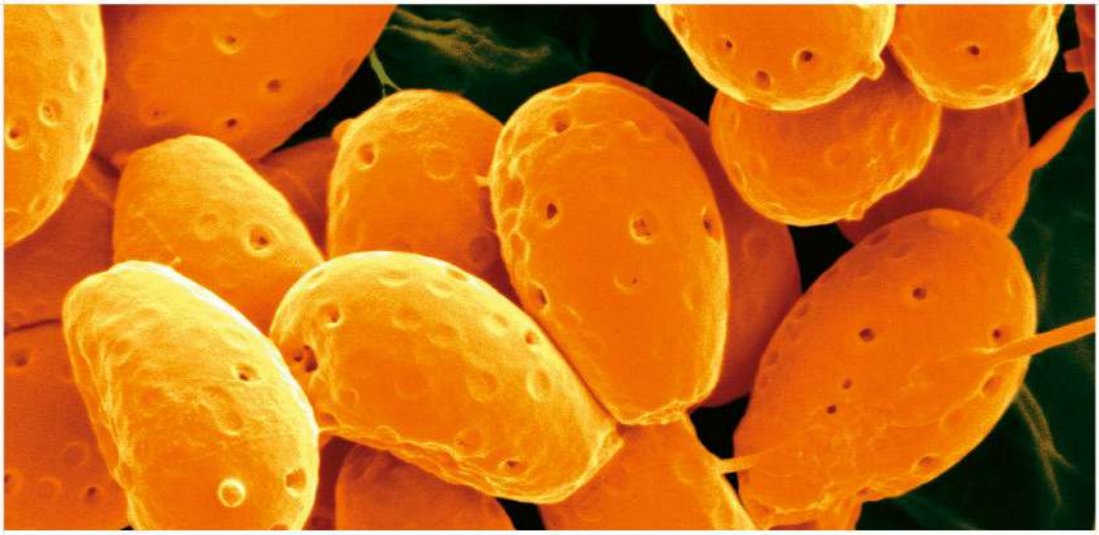
"VRAIS" TRAITEMENTS

Ces champignons font parler d'eux surtout pour leur utilisation dans des compléments alimentaires, des poudres, des boissons – notamment du café – qualifiés d'"adaptogènes", censés aider à combattre le stress, les troubles du sommeil, de la mémoire, de la concentration ou de la digestion, la fatigue ou une libido en berne. Mais dans quelques décennies, ces espèces fongiques pourraient mener à de "vrais" traitements : *"plusieurs recherches ont démontré que certains de leurs constituants, notamment des polysaccharides – des glucides complexes formés de nombreux sucres simples –, peuvent être intéressants contre diverses maladies"*, explique Bruno Donatini. À titre d'illustration, en 2025, des chercheurs de l'université de Yanbian, en Chine, ont rapporté dans la revue *Pharmaceuticals* que lors d'une étude chez le rat, certains polysaccharides du chaga se sont avérés être "prometteurs" contre la polyarthrite rhumatoïde, une maladie inflammatoire sévère qui entraîne la destruction des articulations et ainsi des douleurs et une perte progressive de la capacité à bouger.

Mais il n'y a pas que les champignons de la médecine traditionnelle asiatique ! Certaines espèces fongiques macroscopiques de nos régions semblent également receler des3 molécules intéressantes pour la médecine de demain. C'est le cas du clitocybe inversé (*Paralepista flaccida*), une espèce à chapeau orangé souvent en forme d'entonnoir. Très fréquent dans les forêts de feuillus, en plaine comme en montagne,

© ADOBE STOCK (x2)

Cultivé en laboratoire, *Aspergillus oryzae* (ci-dessus, vu au microscope) est au cœur de nombreux aliments japonais comme le miso, la sauce soja ou le saké. Pour les chercheurs, il est aussi un modèle précieux pour comprendre les liens entre fermentation, alimentation et santé.



Ces spores de *Ganoderma lucidum* (ici grossies 4 500 fois) sont utilisées en médecine traditionnelle chinoise. Leurs molécules sont étudiées pour leurs possibles propriétés anticancéreuses.

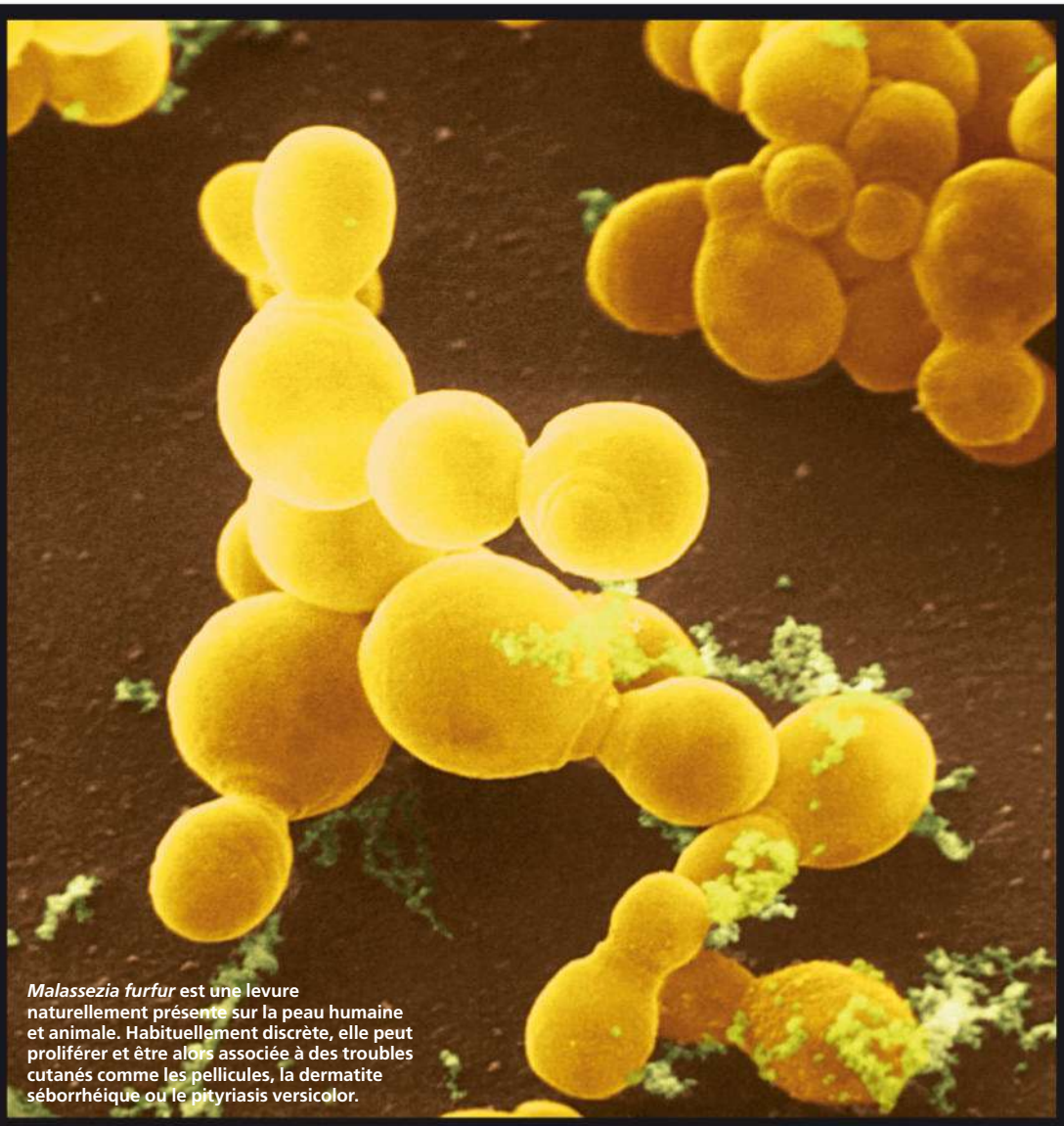
© SCIMAT/SPL

ce champignon est au centre des recherches menées par l'équipe de Fabrice Lejeune, au centre de recherches en cancérologie de Lille. *"Nous nous intéressons à une substance précise de ce champignon : la 2,6-diaminopurine (DAP)"*, précise le biologiste. En 2023, au cours d'une recherche publiée dans *Molecular Therapy*, menée notamment chez la souris, les chercheurs lillois ont montré que la DAP peut corriger un type de mutation du gène CFTR responsable de 10 % des cas de mucoviscidose, une des maladies génétiques graves les plus fréquentes dans les pays occidentaux, qui touche principalement les voies digestives et respiratoires. Plus récemment, début 2026, une équipe américaine a conclu dans la revue *Journal of Thrombosis and Haemostasis* que cette molécule offre également *"une option de traitement prometteuse"* pour une autre maladie génétique : l'hémophilie A, liée à une mutation génétique sur le gène F8 qui code pour le facteur VIII impliqué dans la coagulation du sang, entraînant des hémorragies sévères.

> *"La DAP (une substance du clitocybe inversé) a permis de rendre les cellules cancéreuses visibles pour le système immunitaire, lequel a pu ensuite les combattre"*

CELLULES CANCÉREUSES VISIBLES

Selon des résultats chez la souris, décrits par l'équipe de Fabrice Lejeune fin 2025 dans *Molecular Therapy*, la DAP serait prometteuse pour un autre type de maladies beaucoup plus fréquent : les cancers. Ici, *"la DAP a permis de rendre les cellules cancéreuses visibles pour le système immunitaire, lequel a pu ensuite les combattre. Résultat, la croissance tumorale a été fortement ralentie"*, développe le chercheur lillois. Reste maintenant à vérifier ces promesses des champignons chez l'humain. *"Grâce à notre start-up Genvade therapeutics, créée en 2021,* indique Fabrice Lejeune, *nous souhaitons mettre sur pied un premier essai clinique qui vise à tester la DAP chez des patients atteints de mucoviscidose et porteurs de la mutation corrigée par cette molécule. Si nous arrivons à réunir les fonds nécessaires, cette étude pourrait démarrer dans moins de deux ans."* Le début d'une nouvelle ère pour la pharmacologie. ▪



Malassezia furfur **est une levure naturellement présente sur la peau humaine et animale. Habituellement discrète, elle peut proliférer et être alors associée à des troubles cutanés comme les pellicules, la dermatite séborrhéique ou le pityriasis versicolor.**

DES LEVURES À FLEUR DE PEAU

Il y a des champignons microscopiques qui vivent naturellement sur notre peau. *"Certains peuvent être nocifs, comme la levure* Malassezia*, cause principale des pellicules ; d'autres, au contraire, produisent des substances bénéfiques pour la santé cutanée, comme de la vitamine B sécrétée par diverses 'bonnes' levures"*, explique Marie Drago. En 2016, cette docteure en pharmacie a créé Gallinée, une start-up spécialisée dans les soins de la peau basés sur le microbiome cutané (ensemble des micro-organismes sur la peau). L'entreprise travaille notamment au développement de produits pour les peaux à tendance atopique, à savoir sujettes aux irritations et aux démangeaisons. *"Nous espérons parvenir à des crèmes ou des sérums permettant de fortifier les bonnes bactéries cutanées afin qu'elles puissent réguler les populations de mauvais champignons et levures responsables de ces symptômes"*, détaille la scientifique.

© SCIENCE SOURCE/SPL - RICHARD USATINE MD/SPL

“Profitons des bienfaits du champignon de Paris !”

Pauvres en glucides et lipides, riches en vitamines B et D, en fibres et en antioxydants, les champignons sont des aliments bons pour la santé. Explications du Dr Laurence Plumey *. PAR RIVA BRINET-SPIESSER

SVHS : *Dans notre gastronomie, quelle importance ont les champignons ?*

Laurence Plumey : Les champignons sont loin d’être des “légumes rois” de notre alimentation, comme le sont les haricots verts par exemple. Tout d’abord, ce sont des produits chers. Tout le monde ne peut pas s’offrir des girolles, des morilles ou encore des cèpes. Restent les champignons de Paris *[appelés ainsi, car nés sur les carrières abandonnées au sud de la capitale, NDLR]*, qui poussent aujourd’hui facilement dans les caves *[en Île-de-France ou dans les régions Pays de la Loire ou Centre-Val de Loire, NDLR]*. Ensuite, ceux achetés frais ont une durée de conservation assez courte, ce sont des aliments difficiles à gérer en termes d’approvisionnement pour les restaurateurs, mais aussi pour les particuliers. Il n’est pas rare qu’ils finissent abîmés au fond du frigo. Enfin, les champignons n’ont pas la même importance selon les cultures. Ils sont très populaires en Asie : on y retrouve les fameux shiitakés et les champignons noirs, cuisinés en soupe et dans de nombreux plats. En France, ce ne sont que des accompagnements, servis en petites quantités pour relever un plat, agrémenter une salade ou donner du goût aux sauces à la crème. Il y aurait de quoi réhabiliter le champignon de Paris pour en faire un produit de consommation courante et profiter davantage de ses bienfaits.

SVHS : *Quelles sont les qualités nutritionnelles des champignons ?*

L.P. : Les champignons sont très peu caloriques,

© PATRICK ALLARD/REA

Des employés munis de lanternes procèdent à la cueillette de champignons de couche, cultivés dans d'anciennes carrières abandonnées. Baptisés champignons de Paris, ces proches cousins du rosé des prés ont d'abord été cultivés en Égypte au Nouvel Empire, voici 35 siècles, avant d'être introduits en Europe à l'époque romaine.

moins de 20 calories pour 100 grammes, car il n'y a quasiment pas de lipides ni de glucides dedans. On y trouve un peu de protéines. En réalité, les champignons sont remplis d'eau, ils en contiennent plus de 95 % ! Le reste est surtout composé de fibres, de minéraux, d'oligo-éléments et de vitamines du groupe B. Les espèces sauvages (cèpes, morilles…) renferment bien plus d'antioxydants que les champignons de Paris, car dans les forêts, les variétés sauvages produisent ces molécules pour se défendre des agressions extérieures.

Les champignons qui poussent en forêt en ont donc bien plus que ceux qui vivent en milieu protégé. De plus, les champignons sont les seules espèces non animales à renfermer de la vitamine D2. Sous l'effet des rayons ultraviolets, les humains produisent de la vitamine D3 (ou cholécalciférol) à partir d'un dérivé de cholestérol stocké dans notre derme, puis converti sous sa forme active par le foie et les reins. Les champignons font un peu la même chose. Dès qu'ils sont exposés à la lumière (aux UVB du soleil ou aux rayonnements artificiels), ils produisent de l'ergocalciférol (vitamine D2), équivalent fongique du cholécalciférol, à partir de l'ergostérol, le "cholestérol du champignon". Si l'on veut enrichir son alimentation en vitamine D, on peut donc s'amuser à "booster" des lamelles de champignons en les exposant sur le rebord de sa fenêtre avant de les

Cette ferme champignonnière ultra moderne installée à Qingdao, dans le Shandong en Chine, cultive des shiitakés, un must de la gastronomie asiatique.

manger. Mais attention, cela ne remplace pas une prescription en ampoule de vitamine D en cas de carence !

SVHS : De plus en plus d'entreprises agroalimentaires proposent des steaks, filets ou boulettes à base de mycélium, la partie souterraine des champignons connue pour sa richesse en protéines (environ 12 g pour 100 g). Est-ce une piste intéressante pour remplacer la viande ?

L.P. : Il faut faire attention, car la viande est un concentré de protéines. En comparaison, elle en contient 25 g pour 100 g, soit deux fois plus que le mycélium. La viande contient en plus du fer et de la vitamine B12, le tout formant une matrice. On ne remplacera jamais la viande à l'identique. Les steaks végétaux, comme ceux au soja, ont un bon profil en acides aminés, mais il manquera toujours du fer et de la vitamine B12. Un végétarien doit trouver d'autres sources alimentaires pour les remplacer ; un végan *[qui ne mange aucun produit dérivé d'animaux, NDLR]* doit obligatoirement être supplémenté pour avoir ces apports.

SVHS : En pharmacie, on trouve des substituts au café, sous forme d'extraits de champignons et de plantes, promettant un bien-être physique et mental. Que cachent ces produits précisément ?

L.P. : Il s'agit de "champignons adaptogènes",

> *« Les champignons sont remplis d'eau à 95 %. Le reste est composé de fibres, de minéraux, d'oligo-éléments et de vitamines… »*

© CFOTO/SPUS/ABACAPRESS.COM

Culture de pleurotes à la Caverne, porte de la Chapelle à Paris. Cette ferme urbaine créée en 2017 dans un ancien parking souterrain produit une tonne de champignons chaque semaine.

comme le reishi, le chaga, le Lion's mane et le cordyceps. Ce sont des variétés qui contiennent des molécules (triterpènes, lentinanes…) qui, d'après des études asiatiques, auraient un effet sur la modulation du système immunitaire et sur le système cognitif. Mais les données manquent de précision. Il faut donc bien faire attention à l'usage de ces produits : on peut éventuellement les prendre si l'on n'a pas de problèmes de santé pour se sentir plus détendu, avoir plus d'énergie ou éviter de tomber malade. On est vraiment dans le domaine du mieux-être et non pas dans la thérapie de pathologies nécessitant des traitements médicamenteux. On ne remplace pas un antidépresseur par une boisson aux champignons ! Il faut aussi savoir qu'ils sont contre-indiqués chez les femmes enceintes ou allaitantes, pour qui nous manquons de données. En cas de traitements par chimiothérapie ou hormonothérapie, l'avis d'un oncologue est indispensable, car il existe de nombreuses interactions entre végétaux et traitements médicamenteux. En cas de fatigue non expliquée par des pathologies organiques ou des traitements, et pour laquelle les bilans sanguins ou analyses complémentaires n'ont rien montré de particulier, nous conseillons à ces personnes de regarder de plus près leur mode de vie. Peut-être qu'elles ne mangent pas correctement, ne bougent pas assez ou ne dorment pas bien. Cette approche non médicamenteuse porte un nom : la Napso-thérapie (Napso étant l'acronyme de nutrition, activité physique et sommeil), qui a un objectif de prévention. Un champignon ne fera pas de miracle, mais repenser ces comportements a du sens. ▪

** Laurence Plumey est médecin nutritionniste, praticienne hospitalière à l'hôpital Necker et à l'hôpital Antoine-Béclère. Elle est également professeure de nutrition à l'École de diététique de Paris et fondatrice d'EPM-Nutrition, école de nutrition et de Napso-thérapie.*

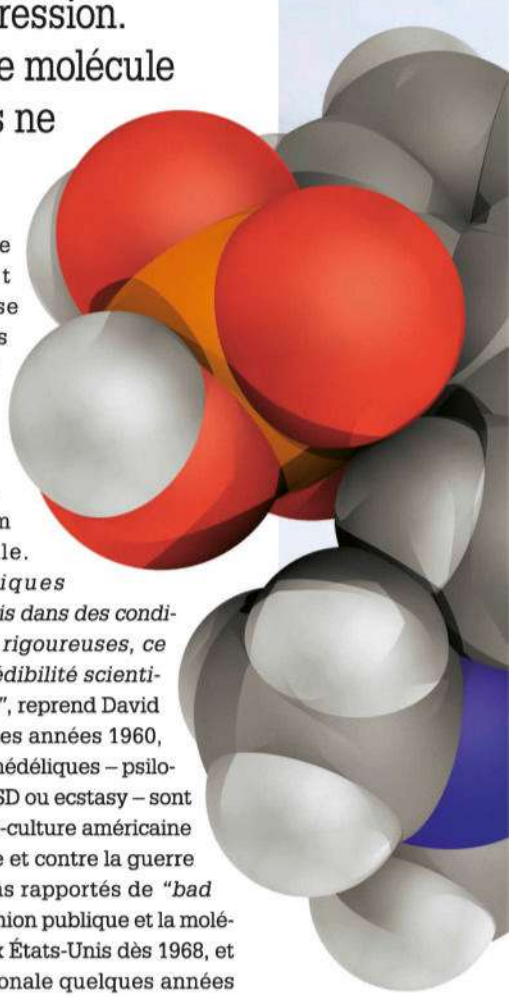
Divergence.CRO0275015

Une arme fatale contre la dépression

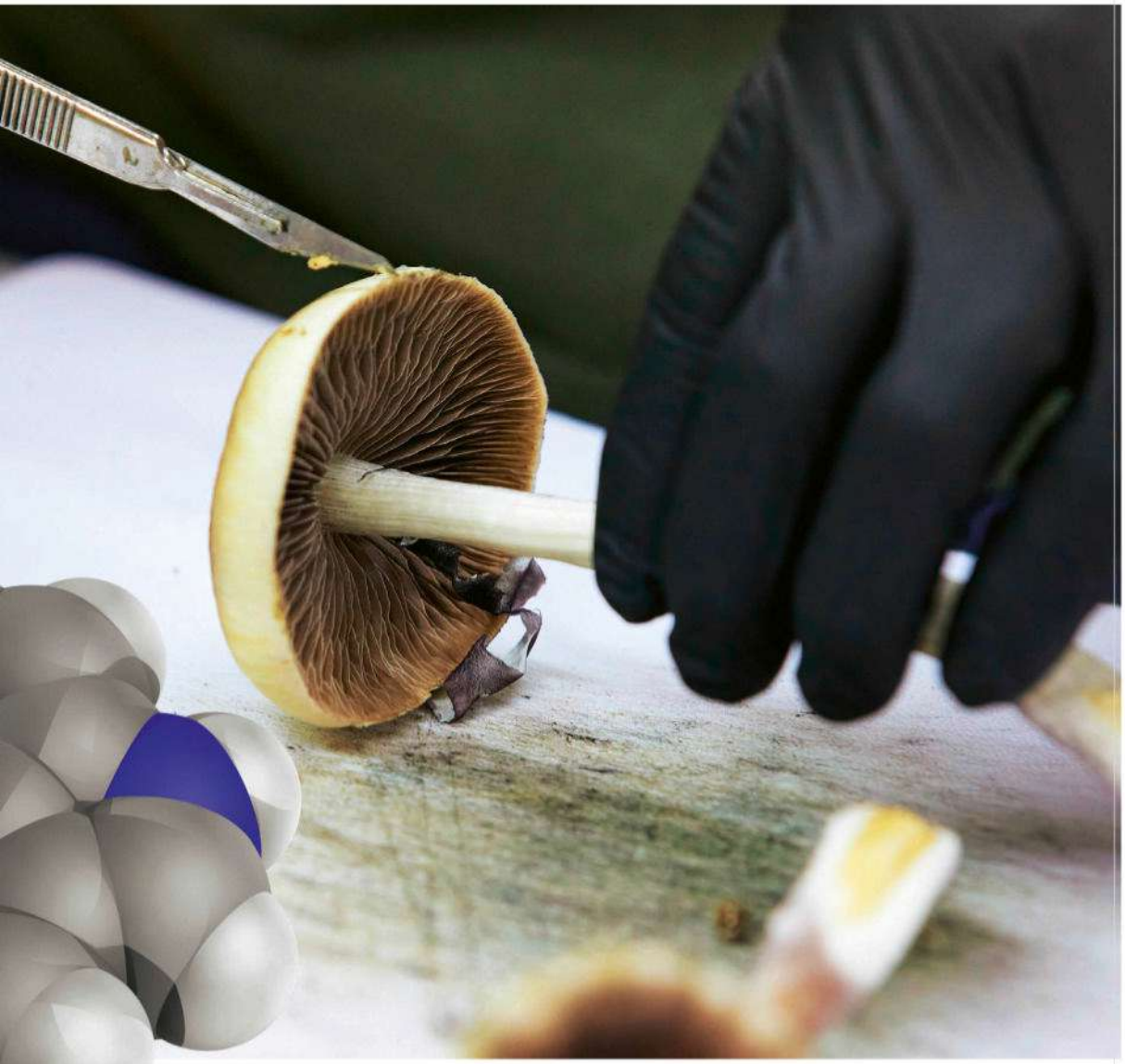
Une étude internationale révèle le potentiel de la psilocybine dans la lutte contre la dépression. Mais la route sera longue avant que cette molécule extraite de champignons hallucinogènes ne soit autorisée… PAR RIVA BRINET-SPIESSER

On peut parler d'une renaissance. Cinquante-cinq ans après son bannissement par l'Organisation des Nations unies, la psilocybine, molécule psychoactive des champignons hallucinogènes, revient sur le devant de la scène médicale, et par la grande porte. Les études cliniques menées sur cette étonnante molécule par le laboratoire britannique Compass – en coopération avec des centres à l'étranger, dont l'hôpital Sainte-Anne à Paris et le CHU de Nîmes – arrivent à leur terme. Grâce à des résultats probants auprès de patients souffrant de dépression résistante, la psilocybine pourrait être autorisée par la Food and drug administration (FDA) dans les prochains mois. *"Cela ouvrirait un potentiel d'innovation considérable dans le champ de la santé mentale, dont le besoin en nouveaux médicaments est énorme"*, souligne David Dupuis, anthropologue et psychologue à l'Inserm. Environ 30 % des patients ne répondent pas aux traitements disponibles aujourd'hui, principalement des antidépresseurs.

En 1958, le chimiste suisse Albert Hofmann synthétise pour la première fois la psilocybine, à l'aide de spécimens de champignons hallucinogènes (dits "psilocybes") cultivés par le Muséum d'histoire naturelle. *"Des essais cliniques démarrent alors, mais dans des conditions d'études peu rigoureuses, ce qui a fragilisé la crédibilité scientifique de la molécule"*, reprend David Dupuis. Puis, dans les années 1960, les substances psychédéliques – psilocybine, mais aussi LSD ou ecstasy – sont associées à la contre-culture américaine (mouvements hippie et contre la guerre du Vietnam). Les cas rapportés de *"bad trip"* inquiètent l'opinion publique et la molécule est interdite aux États-Unis dès 1968, et à l'échelle internationale quelques années



© SPL



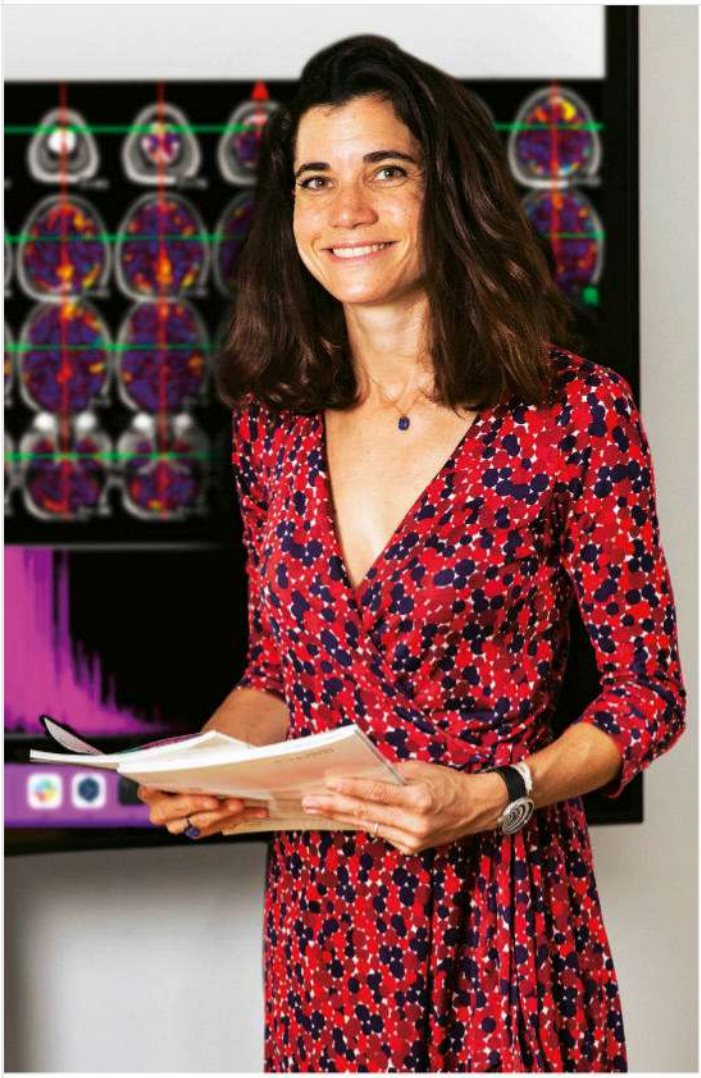
À gauche, molécule de psilocybine, responsable des effets psychédéliques mais aussi curatifs du champignon dont elle est extraite, le psilocybe *(ci-dessus)*.

plus tard. *"Cette période de prohibition a fait perdre plusieurs décennies de recherche médicale"*, observe le chercheur. La molécule reprend du galon au début des années 2000, lorsque des essais encourageants montrent ses effets sur l'anxiété et la dépression.

EFFICACITÉ TRÈS FORTE

Lucie Berkovitch, psychiatre et responsable de l'axe "Psychédéliques" de l'Institut de neuromodulation à l'hôpital Sainte-Anne, égraine les données obtenues sur la psilocybine : *"Après une seule prise, 30 à 50 % des patients résistants aux traitements de la dépression n'ont plus de symptômes trois mois après l'administration."* La molécule est aussi efficace sur le trouble anxieux, avec des résultats positifs chez 60 % des malades pendant plusieurs mois. Elle joue aussi sur l'addiction : la consommation d'alcool est divisée par cinq en moyenne chez les personnes dépendantes à l'alcool et 60 à 80 % des patients dépendants au tabac arrêtent de fumer. Avec ces résultats, tout est inédit : une efficacité très forte, une action immédiate en *"one shot"* (alors qu'un antidépresseur se prend sur plusieurs mois

© CRAIG MITCHELLDYER/AP/SIPA



© CLÉMENCE LOSFELD - KARL MERTON FERRON/BALTIMORE SUN/TNS/SIPA

et demande 3 semaines avant d'agir) et une guérison durable.

Comment expliquer de tels effets ? *"Il y a une combinaison de trois facteurs : une action pharmacologique de la molécule sur le cerveau, un apport de la psychothérapie et un effet placebo certain, car il y a une forte attente des patients"*, remarque l'experte. En termes biologiques, la psilocybine déclenche l'expérience psychédélique en activant le récepteur 5-HT2A à la sérotonine. Elle agit aussi sur d'autres récepteurs, comme des récepteurs aux facteurs de croissance, qui favorisent la neuroplasticité du cerveau, c'est-à-dire l'augmentation des connexions physiques entre les neurones. *"Le stress chronique et la dépression ont tendance à diminuer le nombre de ces connexions. La psilocybine rétablit ce qui a été abîmé"*, poursuit Lucie Berkovitch.

Lucie Berkovitch, psychiatre à l'hôpital Saint-Anne et responsable de l'axe psychédélique de l'Institut de neuromodulation, étudie les effets de la psilocybine sur la dépression, les troubles anxieux et certaines addictions comme le tabac.

SUIVI PSYCHOLOGIQUE

Pour être pleinement efficace, la psilocybine s'accompagne d'un suivi psychologique. *"Notre objectif est de tirer profit de cette fenêtre de neuroplasticité ouverte par les psychédéliques pour faire de la psychothérapie dite intensive. Dans les jours et semaines qui suivent les prises de psilocybine, les patients ont une plus grande capacité à abandonner leurs pensées négatives et leurs comportements automatisés"*,

Un chercheur de l'UMMS (University of Maryland Medical System), aux États-Unis, étudie les effets de la psilocybine sur le cerveau des souris à qui elle a été administrée.

explique Amandine Luquiens, psychiatre et addictologue au CHU de Nîmes, qui mène des études sur des personnes souffrant à la fois d'alcoolisme et de dépression.

Le jour où la psilocybine deviendra un médicament (ce qui demandera du temps, les étapes à franchir pour une mise sur le marché sont encore nombreuses), comment sera-t-elle prescrite ? En raison de son effet psychédélique, elle sera sûrement administrée à l'hôpital, avec un accompagnement par un psychiatre avant, pendant et après la prise. Mais des études qui démarrent à l'hôpital

> *« 30 à 50 % des patients résistants aux traitements de la dépression n'ont plus de symptômes trois mois après l'administration »*

Sainte-Anne pourraient laisser espérer, à terme, une prise du médicament à la maison. L'objectif du protocole est de supprimer l'expérience psychédélique pour ne garder de la molécule que son effet antidépresseur. *"On utilise des antidotes qui bloquent le récepteur à la sérotonine* [dont l'activation déclenche l'effet psychédélique, NDLR], *mais pas ceux qui jouent sur la neuroplasticité*, détaille Lucie Berkovitch, qui mène l'étude. *Pour toutes les personnes qui présentent des contre-indications ou qui ont peur des effets psychédéliques, ce serait une opportunité formidable d'accéder au traitement."*

EFFET PSYCHÉDÉLIQUE

Effectivement, la psilocybine est accompagnée d'une image controversée, associée aux effets psychédéliques qui surviennent lors de la consommation de champignons hallucinogènes dont elle constitue le principe actif (visions de formes géométriques, de paysages, mouvements accompagnés de volutes, sensations extatiques…). *"Nous avons un travail de dédiabolisation à mener pour remettre un peu d'ordre entre ce qui relève de la rumeur et ce qui est établi par la science. Il y a eu de rares accidents dans les années 1960, mais ceux-ci ont été très médiatisés et des généralités en ont été tirées"*, souligne Lucie Berkovitch. Il convient aussi de rappeler que l'usage médical de la psilocybine ne comporte pas les mêmes risques qu'un usage récréatif. *"Lorsque nous sélectionnons les patients, nous veillons à ne pas inclure de personnes présentant des facteurs de risque. De plus, l'administration est accompagnée par un thérapeute en continu, rendant le risque d'accident infime"*, conclut la chercheuse. ▪

Promesses d'un monde invisible

Microscopiques et difficilement cultivables, les champignons marins restent dans l'ombre. Ils recèlent pourtant un réel potentiel dans des domaines aussi variés que la santé ou le recyclage. PAR MATHIAS CHAILLOT

Dans les profondeurs abyssales ou sur du bois flotté, associés aux algues ou aux animaux marins, de la surface aux sédiments profonds, les champignons ont colonisé le monde aquatique. Moins connus que leurs cousins terrestres, ils ont été détectés dans pratiquement tous les habitats marins étudiés. Et si beaucoup appartiennent à des lignées également présentes sur terre, d'autres ont développé des adaptations spécifiques à la vie océanique, ouvrant un champ d'exploration fascinant.

Depuis la première description de champignons marins en 1849 par le français Jean Baptiste Henri Joseph Desmazières, 2 300 espèces ont été caractérisées. *"Cela peut paraître peu rapporté aux plus de 150 000 espèces de champignons décrites à l'échelle mondiale"*, concède Gaëtan Burgaud, professeur à l'université de Bretagne occidentale, spécialisé en écologie microbienne et en mycologie marine. *"Cela signifie surtout qu'il reste énormément à découvrir."* L'océan demeure une terra incognita fongique.

Bien moins étudiés que les bactéries marines par exemple, les champignons marins pourraient pourtant jouer un rôle écologique plus important qu'imaginé. Plusieurs travaux [1] soulignent un rôle actif dans la dégradation de la matière organique, le recyclage du carbone ou les flux biogéochimiques océaniques, même si leur contribution reste difficile à quantifier. Ils représentent également une source importante de métabolites secondaires (ou métabolites spécialisés) : alcaloïdes, peptides, terpènes… Plus de 3 500 molécules de champignons marins ont déjà été décrites, alors que les génomes de nombreuses espèces laissent entrevoir un réservoir encore plus vaste.

Pendant longtemps, leur étude s'est limitée à la description ponctuelle de quelques espèces observées sur des algues ou des bois immergés. *"Nous ne disposions tout simplement pas des outils actuels, ce qui explique que la discipline n'ait pas vraiment décollé dans un premier temps"*, explique Gaëtan Burgaud. Pression, température, salinité, disponibilité des nutriments, interactions avec d'autres formes de vie… Les conditions des environnements marins complexes, souvent difficiles, voire impossibles à reproduire en laboratoire, ont aussi empêché la culture

© LUBEM / UBO

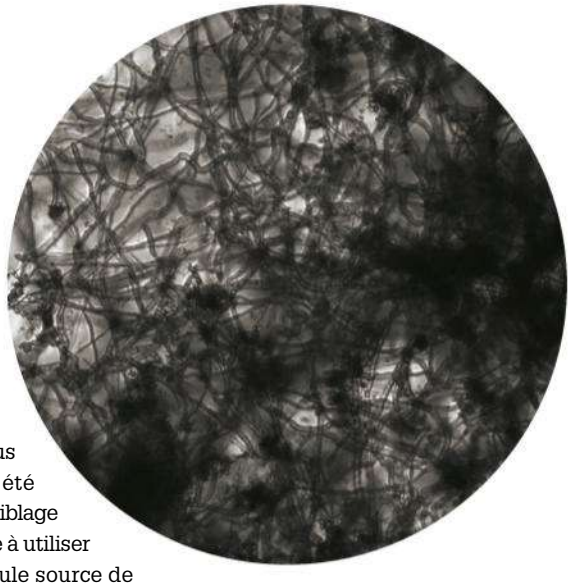
Cette levure marine des grands fonds, provenant d'une source hydrothermale, change de forme lorsqu'elle est soumise à la très forte pression qui règne au fond de l'océan : de cellule ronde, elle devient filamenteuse. Les parois cellulaires, colorées en bleu, permettent d'observer les cloisons qui séparent les cellules.

de nombreuses espèces. Les techniques modernes basées sur les acides nucléiques ont changé la donne et permettent désormais de détecter des champignons qui échappaient aux méthodes classiques.

ENZYMES PARTICULIÈRES

Si les champignons issus des environnements extrêmes, comme les sources hydrothermales profondes ou les régions polaires, attirent l'attention, c'est parce qu'ils produisent parfois des enzymes particulières. Pour Gaëtan Burgaud, *"dans le domaine de la santé, la bioremédiation ou des secteurs industriels comme l'agroalimentaire, la pharmacie ou la chimie verte, ces enzymes résistantes et stables dans des conditions contraignantes présentent un intérêt évident"*. Mais les espèces fongiques se développant dans des habitats plus "ordinaires" pourraient aussi présenter des avantages. Ainsi, les débris plastiques constituent de véritables écosystèmes miniatures colonisés par une multitude d'organismes : la plastisphère. Parmi eux, des champignons microscopiques largement méconnus, dont certains auraient la capacité d'utiliser des polymères comme source de carbone grâce aux enzymes complexes qu'ils sécrètent.

Des chercheurs du laboratoire universitaire de biodiversité et d'écologie microbienne de l'université de Brest réalisent depuis plusieurs années des expérimentations d'immersion de plastiques en milieu marin afin d'étudier les communautés fongiques qui les colonisent. Des centaines de conditions de culture ont été testées. *"Cela nous a permis de constituer*



une collection de plus de 2 500 isolats fongiques issus de cette plastisphère", détaille Gaëtan Burgaud. Les isolats les plus prometteurs ont ensuite été soumis à des tests dits de criblage afin d'évaluer leur capacité à utiliser des polymères comme seule source de carbone. *"Lorsque la colonie croît dans ces conditions, cela suggère que le champignon parvient à utiliser une partie du plastique"*, donc à le dégrader. C'est au cours de ce processus qu'un isolat original a attiré l'attention de l'équipe[2]. Son identification par séquençage a révélé une nouvelle espèce que les chercheurs proposent de baptiser *Penicillium plastivorans*, littéralement "Penicillium mangeur de plastique". *"Cette souche présente un potentiel particulièrement riche, avec plusieurs enzymes connues pour être impliquées dans la dégradation de plastiques, qu'ils soient conventionnels ou biodégradables. C'est un peu une souche couteau suisse"*, résume Gaëtan Burgaud. L'objectif est maintenant d'exploiter les enzymes dans des procédés industriels afin de compléter les approches classiques de recyclage.

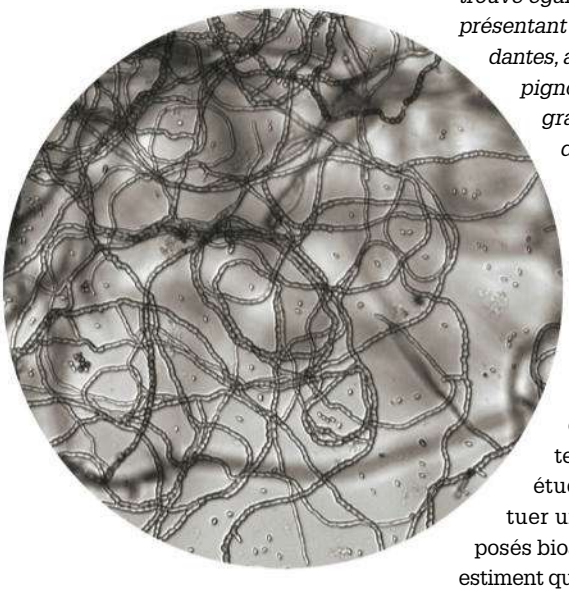
Ces champignons, mis en culture et observés au microscope, ont été isolés à partir de déchets plastiques qu'ils ont colonisés en mer. Ils sont issus de la "plastisphère", l'écosystème microbien qui se développe à la surface de ces rebuts.

FAIBLES RENDEMENTS

D'autres champignons marins sont à l'étude pour mettre en évidence leur capacité à dégrader des polluants aussi divers que les hydrocarbures ou les pesticides. *"Mais il faut rester prudent : nous en sommes aux premières étapes*, reconnaît le chercheur. *Les rendements des enzymes identifiées restent faibles*

© LUBEM / UBO

> *« Les champignons marins, notamment ceux des grands fonds, constituent un vivier de molécules en pleine croissance »*



et il faudra encore de nombreuses années pour optimiser leur efficacité. Comme dans le domaine pharmaceutique, où dix à quinze ans peuvent séparer une découverte de son utilisation concrète, le passage du laboratoire à l'industrie demande du temps."

L'industrie pharmaceutique est justement l'un des domaines où les champignons marins ont déjà démontré leur potentiel. La découverte de la céphalosporine dans les années 1940 a ainsi conduit à l'une des familles d'antibiotiques les plus utilisées au monde. Plus récemment, la plinabuline, un agent antitumoral produit à partir d'un champignon marin du genre *Aspergillus*, a atteint des phases cliniques avancées. *"On trouve également de nombreuses molécules présentant des activités antivirales, antioxydantes, anti-inflammatoires, etc. Les champignons marins, notamment ceux des grands fonds, constituent un vivier de molécules en pleine croissance"*, ajoute Gaëtan Burgaud. À l'heure actuelle, les genres *Penicillium*, *Aspergillus*, *Acremonium* et *Cladosporium*, relativement simples à isoler et à cultiver, fournissent une grande partie des composés naturels. Les champignons strictement marins et absents des environnements terrestres, plus difficiles à isoler et étudier, pourraient pourtant constituer une ressource précieuse en composés bioactifs. D'autant que les chimistes estiment que plus des deux tiers des produits naturels issus de la vie marine sont introuvables chez les organismes terrestres. ▪

(1) "Planktonic Marine Fungi: A Review", X. Peng et al., Journal of Geophysical Research: Biogeoscience*s, 2024 ; "Marine Fungi", G. Burgaud* et al., The Marine Microbiome*, éd. Springer, 2022.*
(2) "Colonization and Biodegradation Potential of Fungal Communities on Immersed Polystyrene vs. Biodegradable Plastics: A Time Series Study in a Marina Environment", A. Philippe et al., Journal of Fungi*, 2024.*

CULTIVATEURS À SIX PATTES

La nature n'a pas attendu l'humain pour développer la culture des champignons : fourmis, termites ou coléoptères le font déjà depuis des millions d'années. PAR HÉLOÏSE RAMBERT

Vous avez sans doute déjà vu ces images de fourmis tropicales en file indienne, transportant de petits morceaux de feuilles ou de pétales colorés sur leur dos. Si elles se pressent avec leur butin, c'est pour s'en régaler… à condition de passer par un intermédiaire qui va leur mâcher le travail. *"Elles sont incapables de digérer ces tissus végétaux"*, explique Marc-André Selosse, professeur au Muséum national d'histoire naturelle. *"Elles vont d'abord nourrir un champignon qu'elles font pousser sur une sorte de meule à l'intérieur de la fourmilière, dans des chambres spéciales où la température et l'humidité sont régulées."* La matière végétale sert de substrat au champignon qui la transforme en élément digestible pour ces fourmis dites champignonnistes : à force de manipuler le champignon et de le tailler, celui-ci produit des "gongylidia", des renflements riches en nutriments dont les fourmis se nourrissent.

Toutes les fourmis n'ont pas développé cette compétence, mais celles du genre *Atta* en ont fait une spécialité. Chez les termites, c'est le groupe des macrotermes qui a choisi cette voie. *"La stratégie des termites est un peu différente,* précise le spécialiste. *Ils mangent des débris végétaux, notamment du bois, qu'ils ne peuvent pas assimiler en intégralité. Et ils déposent leurs crottes sur des champignons qu'ils élèvent. Ces champignons, eux, peuvent se nourrir de ces restes."* Là encore, rien ne se perd, tout se transforme. Les termites complètent leur alimentation par la consommation de ces champignons.

La nature compte bien d'autres exemples de ces collaborations. Comme chez les scolytes, une sous-famille de coléoptères, qui affectent par exemple l'orme. Le champignon pousse dans les galeries que les insectes creusent. *"Leur association à des champignons remplit deux rôles,* détaille Marc-André Selosse. *Souvent, ils aident à affaiblir l'arbre, ce sont des auxiliaires d'attaque. Et dans d'autres cas, en plus, le petit scolyte mange le champignon."* Les insectes ne sont pas les seuls concernés : les scientifiques connaissent ainsi un petit escargot de bord de mer capable de déchirer les feuilles des spartines – de petites herbes qui poussent dans les estrans vaseux – et d'y inoculer un champignon. *"Ils reviennent quelque temps plus tard pour brouter ce champignon qui a poussé sur la feuille"*, explique le biologiste.

CONVERGENCES ÉVOLUTIVES

Ces convergences évolutives entre mondes animal et mycologique, qui ont émergé il y a des millions d'années, sont une leçon d'humilité pour l'homme qui, finalement, n'a rien inventé. *"C'est exactement ce que nous faisons avec le pleurote ou le champignon de Paris,* souligne le scientifique. *On propage le premier sur du bois ou de la sciure et le*

© MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

À l'intérieur de leur fourmilière, les fourmis champignonnistes *Atta* engraissent un champignon à l'aide de découpes de feuilles et de fleurs. Il sert, entre autres, à nourrir leurs larves.

second sur du crottin de cheval. Là aussi, on transforme ces substrats immangeables en champignons comestibles et digestes." Doit-on en conclure que les insectes et les gastéropodes ont inventé l'agriculture ? Ce serait pousser le champignon un peu loin. *"Le fait de maîtriser le développement et la reproduction d'une espèce utile, notamment pour manger, ne nous est pas propre,* tempère Marc-André Selosse, *mais, comme souvent, l'homme a poussé le principe à son paroxysme."* ▪

Les fourmis champignonnistes collectent des feuilles. Les ouvrières *maxima* les découpent à l'aide de leurs puissantes mandibules, puis les confient aux ouvrières *intermedia*, qui les ramènent en convoi jusqu'au nid.

Des alliés de longue date

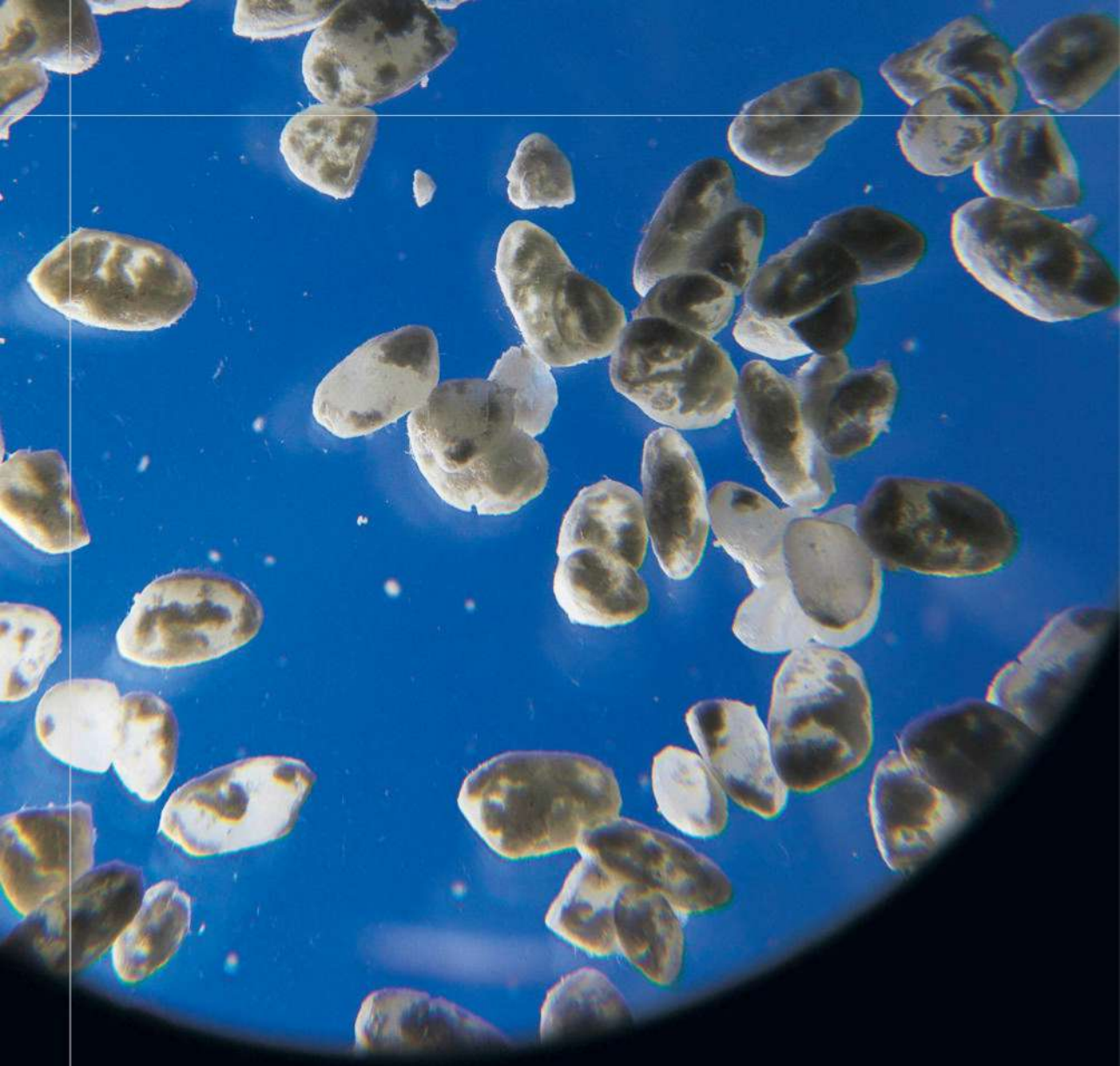
Levures, ferments, propriétés médicinales ou tinctoriales… Des polypores aux lichens, les humains exploitent les ressources fongiques depuis la préhistoire, avec plus ou moins de bonheur.

PAR CHARLOTTE LEDUC

Ganoderma lucidum, le champignon sacré

Il est moins coloré qu'une amanite tue-mouches, moins savoureux qu'une truffe noire, et pourtant *Ganoderma lucidum* est l'un des champignons les plus importants d'Asie. Les noms vernaculaires prouvent l'admiration qu'on lui porte : *lingzhi*, en Chine, pour "champignon de l'immortalité" ; au Japon, *reishi* ("champignon divin") et *mannentake* ("champignon de 10 000 ans"). Les sociétés humaines tissent des liens depuis au moins deux mille ans avec lui. *"Le* lingzhi *est le fameux champignon d'immortalité que recherchaient les taoïstes. Le consommer équivalait à peu près, à leurs yeux, à avaler la grande drogue alchimique"*, souligne Bernard Allanic, maître de conférences, dans un article rédigé en 1991 et intitulé "Une plante magique – le *lingzhi*". Dès lors, rien d'étonnant à ce qu'il se retrouve dans les premiers traités de pharmacopée chinoise, dont le *Shennong bencao jing* (ou *Classique de la matière médicale du Laboureur Céleste*). Mais beaucoup d'espèces sont confondues sous ce nom : *"Quand on parle de ganoderme luisant, en fait, on parle de plusieurs espèces ; la taxonomie n'est pas claire"*, précise Hubert Voiry, ingénieur forestier retraité, mycologue et auteur de *10 champignons qui ont changé la vie des hommes*. Malgré l'incertitude des produits commercialisés sous le nom de *"reishi"*, la quête d'immortalité subsiste…

© ADOBE STOCK



© MARKUS KIRCHGESSNER/LAIF/REA

Aspergillus oryzae, un ferment venu d'Asie

Les sociétés humaines ont aussi exploité des champignons microscopiques. Au temps où il n'y avait ni réfrigérateur ni congélateur, il fallait bien trouver un moyen de conserver les aliments. Lequel ? La fermentation ! Les micro-organismes, dont les champignons, sous certaines conditions, dégradent les sucres et produisent d'autres molécules comme de l'alcool ou des acides (les premiers sont des antimicrobiens, les seconds abaissent le pH et créent un milieu peu propice au développement de bactéries pathogènes). Si, en Europe, *Saccharomyces cerevisiae* a permis la fabrication du diptyque pain-vin, les peuples asiatiques ont leur propre micro-organisme fongique fétiche : *Aspergillus oryzae*. Sans lui, adieu sauce soja, saké, miso et autres ingrédients culinaires. Quand ce champignon fermente, il produit des enzymes capables de dégrader les protéines et l'amidon contenus dans les fèves de soja, les grains de riz ou de blé – une technique née en Chine il y a plusieurs milliers d'années. En mars 2020, le champignon a même été testé dans l'espace. Des scientifiques ont produit du miso à partir d'*Aspergillus oryzae* dans l'ISS. De retour sur Terre, la pâte a été analysée et comparée à un miso témoin terrestre. Résultat : match nul. Peut-être le futur en-cas des astronautes ?

Avec *Roccella tinctoria*, les tissus prennent des couleurs

Les lichens n'échappent pas à l'ingéniosité des humains : ces derniers ont trouvé à les employer dans l'habillement. *"Pendant l'Antiquité, la teinture rouge pouvait être obtenue avec le murex, un coquillage de Méditerranée, mais c'était difficile et cher ; ou à l'aide de lichens maritimes, plus accessibles et moins coûteux"*, précise Marie Marquet, archéologue et ethnologue, spécialiste des techniques textiles et des teintures. Les lichens offrent une palette de substances colorantes. Parmi les espèces reconnues figure *Roccella tinctoria*, appelée aussi orseille. *"En archéobotanique, on trouve la mention des sources de teinture, mais sans la recette,* explique l'archéologue. *Du coup, on en déduit les espèces de lichens utilisées, comme certaines roccelles, mais on ne peut pas affirmer qu'il s'agit de* Roccella tinctoria *ou de* Roccella fuciformis." Une chose est sûre : les teintures à base de lichens se développent particulièrement dans les zones où les ressources végétales sont limitées. *"Le tweed en Écosse a longtemps été fabriqué à partir de la laine locale teinte avec les lichens cueillis à proximité"*, complète Marie Marquet. Mais cette technique n'est viable qu'à petite échelle : les lichens poussent lentement, très lentement…

Fomes fomentarius, briquet préhistorique

L'histoire entre humains et champignons commence au moins dès le Néolithique. La "momie des glaces" *(ci-dessus)* en a donné la preuve. Découvert en 1991 dans les Alpes de l'Ötztal, cet individu, surnommé Ötzi, portait 3 petits morceaux de champignons. Les deux premiers provenaient de polypores du bouleau *(Fomitopsis betulina)*, le troisième d'amadouvier *(Fomes fomentarius)*. L'homme aurait utilisé le premier polypore pour ses propriétés médicinales et l'amadouvier lui aurait permis d'allumer des feux. Ce champignon est en effet l'un des trois éléments indispensables pour faire un feu par percussion. Cette méthode consiste à frapper un composé minéral comme la pyrite contre une roche dure comme le silex. Le choc produit des étincelles qui embrasent la fibre de l'amadouvier, lequel agit comme la mèche d'un briquet…

© ALAMY/HEMIS.FR - SAMADELLI MARCO/EURAC/ DPA/PICTURE ALLIANCE

Claviceps purpurea, l'ergot qui rend fou

Si la peste noire est restée dans les mémoires, un autre mal fait des ravages au Moyen Âge. Ni virus ni bactérie, le coupable est un champignon : *Claviceps purpurea (ci-dessous, en brun)*. *"Il y a eu beaucoup de morts à cause de l'ergot du seigle"*, souligne Hubert Voiry. L'ergotisme n'est pas contagieux, mais le champignon parasite pousse sur le seigle, contamine les farines et donc le pain. La maladie apparaît sous deux formes : une gangréneuse, l'autre convulsive. Cette dernière pourrait expliquer "l'épidémie de danse" à Strasbourg en 1518, qui vit des centaines d'Alsaciens se mettre à danser frénétiquement des jours durant, jusqu'à en mourir. Au fil du temps, les imaginaires autour de l'ergotisme se sont mélangés avec les affaires de sorcellerie – *Claviceps purpurea* fut peut-être utilisé dans le cadre de rituels d'inspiration chamanique. Ce n'est qu'au milieu du XIXe siècle que des botanistes comprennent la nature fongique de l'ergot du seigle. L'histoire de ce parasite bascule alors. Des chimistes isolent certains alcaloïdes et synthétisent par sérendipité le LSD. Mais l'ergot du seigle n'a pas fini d'effrayer : en 1951, les habitants et habitantes de Pont-Saint-Esprit tombent malades. À l'époque, le pain est mis en cause : il aurait été façonné à partir de blé contaminé… mais cet étrange cold case de l'histoire médicale n'a jamais été complètement résolu.

© ADOBE STOCK

Amanita muscaria, star chez les Schtroumpfs

"C'est le champignon auquel on pense spontanément", clame Hubert Voiry. Avec son chapeau rouge à points blancs, l'amanite tue-mouches joue les stars de la pop culture et stimule nos imaginaires. Elle inspire aussi bien la couverture d'un album de Tintin que les jeux vidéo – c'est le champignon emblématique de la franchise "Super Mario". Sans surprise, l'amanite tue-mouches est le premier emoji fongique jamais créé ! Mais la maison des Schtroumpfs ne se résume pas à sa physionomie. Traditionnellement, elle est utilisée pour ses propriétés hallucinogènes. *Amanita muscaria* produit en effet des composés psychoactifs tels que le muscimole et l'acide iboténique, très utilisés lors de rites chamaniques ancestraux pratiqués notamment en Sibérie. Mais ce n'est pas sans risque, car ce champignon est par ailleurs très toxique.

Mycophiles vs mycophobes

Dans les années 1950, Valentina Pavlovna et Robert Gordon Wasson, les cofondateurs de l'ethnomycologie, observent des attitudes très différentes vis-à-vis des champignons : détestés à l'Ouest, adorés à l'Est. *"Les champignons sont une partie de la culture de chaque ethnie"*, précise aujourd'hui Pierre-Arthur Moreau, maître de conférences à l'université de Lille et mycologue. Redoutés, ignorés, adorés… Ces relations illustrent les liens que les sociétés entretiennent avec leur environnement. Là où la nature est rapidement domestiquée, la méfiance s'impose. *"Quand les peuples ont suffisamment de ressources alimentaires, ils ne s'intéressent pas aux champignons, d'autant plus que leur consommation peut être toxique, alors pourquoi s'exposer ?"*, ajoute le mycologue. À l'inverse, les populations d'Europe de l'Est, soumises aux invasions régulières, ne pouvaient s'installer durablement ; elles voyaient donc les champignons comme des denrées utiles. Encore plus à l'est, en Asie, les champignons sont cultivés depuis des milliers d'années. Cette dichotomie se retrouve dans les mots. Si en France, on a les trompettes-de-la-mort, les bolets de Satan et autres noms effrayants, de l'autre côté du globe, le mot japonais *kinoko* désignant les champignons signifie "le fils de l'arbre", une vision plus poétique et moins diabolique. Et en Afrique ? Au nord, la peur domine. En zone tropicale, *"chaque ethnie a une liste de champignons connus et ignore le reste"*, poursuit Pierre-Arthur Moreau. Reste une dernière posture : la communication avec l'au-delà grâce aux champignons hallucinogènes et aux rites chamaniques. Des coutumes très présentes en Amérique centrale où les champignons psychotropes poussent facilement.

© ADOBE STOCK

COMBATTRE

***Cronartium ribicola*. Communément appelé "rouille", ce minuscule champignon infeste le cassissier *(photo)* et le pin blanc.**

© ADOBE STOCK

Tueurs en série

Quasi invisibles à l'œil nu, certains champignons se révèlent être des parasites aussi redoutables qu'inventifs. Carnages en cours… PAR CÉLINE LISON

La scène est digne d'un film de zombies. Une fourmi charpentière des forêts tropicales, seule, quitte sa colonie, grimpe rapidement à un arbre et plante ses mandibules au bout d'une branche avant de se figer. Pour l'éternité. Bientôt, une sorte de longue "antenne" va pousser à l'arrière de sa tête : l'appareil fructifère du champignon *Ophiocordyceps* qui l'a infectée. Ce pédoncule va disséminer des spores qui pourront parasiter de nouveaux individus.

Les scientifiques s'intéressent de près aux différents modes opératoires des champignons pathogènes et, désormais, on comprend mieux cette "zombification". En se développant dans son hôte, l'*Ophiocordyceps* parvient d'abord à contrôler l'exosquelette et les muscles de sa victime. Sans envahir directement son cerveau, le champignon sécréterait des protéines capables de moduler le fonctionnement neuronal de l'insecte. Un peu comme un marionnettiste, il le "déplacerait" jusqu'à un site propice à la dissémination de ses spores. Les chercheurs ont montré que plus d'une quinzaine d'espèces d'*Ophiocordyceps*, chacune spécifique à une fourmi ou à un groupe de fourmis hôtes, étaient capables d'une telle manipulation comportementale. Une spécialisation qui suggère une coévolution ancienne entre le parasite et ses hôtes. Une étude publiée en juin 2025 dans *The Royal Society Publishing* révélait que deux espèces de champignons parasites fossiles avaient été piégées dans l'ambre avec leur fourmi-hôte. C'était il y a près de 99 millions d'années.

Une fourmi *Pachycondyla* infestée par un champignon *Cordyceps*: les deux "antennes" surgissant de part et d'autre de sa tête sont en réalité l'appareil fructifère du parasite. À droite: une feuille de cassissier touchée par le champignon *Cronartium ribicola*.

Depuis les années 1990, c'est une autre "épidémie", encore plus massive, qui décime les batraciens du monde entier. Ses auteurs sont deux champignons chytrides microscopiques : *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd) et *Batrachochytrium salamandrivorans* (Bsal). La mycose qu'ils provoquent ronge la peau des batraciens, une zone vitale pour leur respiration et les échanges avec le milieu aquatique. Les zoospores s'y fixent, la pénètrent et forment des structures reproductrices qui libèrent de nouvelles spores. Un individu contaminé peut diffuser la maladie à un individu sain par simple contact.

EXPANSION FULGURANTE

En Asie, d'où les chytrides sont originaires, les batraciens ont coévolué avec eux et ont acquis la capacité de se défendre. Mais le commerce des amphibiens – pour les animaleries et la

© PIOTR NASKRECKI / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO - ADOBE STOCK

« L'émergence de maladies infectieuses causées par des champignons pathogènes représente une menace sérieuse pour la faune sauvage et la stabilité des écosystèmes »

consommation – a permis aux pathogènes de voyager à vitesse grand V. Et de croiser des hôtes qui, eux, n'étaient pas "préparés" à cette rencontre. L'expansion a été fulgurante. On estime aujourd'hui que Bd a provoqué à lui seul l'extinction de 90 à 120 espèces d'amphibiens et a contribué au déclin de plus de 500 autres. Rien qu'aux Pays-Bas, Bsal a pour sa part fauché 96 % des populations de salamandres tachetées en seulement trois ans. Ces pathogènes seraient les plus meurtriers observés chez les vertébrés.

La dispersion liée aux activités humaines est aussi à l'origine de l'expansion de *Pseudogymnoascus destructans*. Originaire d'Europe, ce champignon qui provoque le syndrome du "nez blanc" chez les chauves-souris est apparu en Amérique du Nord en 2006, via des spéléologues dont l'équipement était souillé par des spores. Cette fois encore, les dégâts sont considérables : dans certaines régions des États-Unis, les populations de chiroptères ont chuté de 90 %. Avec des effets en cascade, décrits par la biologiste de l'évolution Tatiana Giraud (CNRS) dans son dernier ouvrage * : une explosion du nombre d'insectes ravageurs dont se nourrissaient ces mammifères, une forte augmentation de l'usage de pesticides pour tenter de s'en débarrasser, une baisse

Au Pérou, cette petite grenouille *Bryophryne cophites* fait partie des victimes d'un redoutable parasite, *Batrachochytrium dendrobatidis*, qui provoque une mycose mortelle pour l'animal.

des rendements d'un tiers et une hausse de la mortalité infantile par cancers liés aux pesticides…

"L'émergence de maladies infectieuses, notamment celles causées par des champignons pathogènes, représente une menace sérieuse pour la santé publique, la faune sauvage et la stabilité des écosystèmes", insistait en 2025 une équipe internationale dirigée par des scientifiques de l'université de Montpellier. Leur étude, publiée dans *Nature*, porte sur plus de 5 400 échantillons fongiques collectés à travers l'Eurasie et l'Amérique du Nord. Elle a permis de révéler que le syndrome du nez blanc est causé en réalité par deux espèces de *Pseudogymnoascus*, morphologiquement identiques, mais génétiquement différentes. Si ces deux espèces se rapprochent, s'alarme l'équipe, on pourrait craindre l'émergence d'un nouveau variant, potentiellement encore plus virulent…

Le règne végétal n'échappe pas non plus aux attaques fongiques. Depuis le début des années 1990, en Europe, des millions de jeunes frênes sont lourdement affectés par la chalarose provoquée par *Hymenoscyphus fraxineus*, un champignon venu d'Asie. La maladie se propage d'environ 60 km par an. De même, en Amérique du Nord, les châtaigniers ont quasiment disparu durant la première moitié du XXe siècle alors qu'ils y étaient dominants. Leur bourreau : *Cryphonectria parasitica*, un ascomycète d'origine est-asiatique, agent du chancre. La maladie affecte l'écorce qui devient rougeâtre avant

Le chancre du châtaignier *(Cryphonectria parasitica)* fait des ravages en Amérique du Nord.

© EMANUELE BIGGI/NATUREPL.COM - FOREST RESEARCH

Mine de Greeley, dans le Vermont aux États-Unis: ce vespertilion brun est atteint du syndrome du nez blanc, provoqué par *P. destructans*.

de se craqueler, faisant dépérir, voire mourir l'arbre. La progression de *C. parasitica* en Europe est jusqu'ici limitée par un virus qui le parasite et diminue sa virulence.

L'ARME GÉNÉTIQUE

De leur côté, les chercheurs tentent de mieux comprendre comment certains champignons pathogènes s'adaptent si rapidement à leurs hôtes. *"Très récemment, on s'est aperçus qu'il y avait dans leur génome une grande région qui ne recombine pas*, explique Tatiana Giraud. *Ils ont ainsi deux allèles très différents qui se maintiennent à 50 % dans les populations. On essaie de comprendre quels sont les avantages évolutifs de ce phénomène très inhabituel. D'autant qu'à l'intérieur de ces variants, il y a des* 'starships', *des éléments mobiles énormes, qui bougent à la fois dans les génomes et entre espèces. Or, on sait que ces modules ont été impliqués dans nombre de maladies émergentes provoquées par des champignons."* Si *C. parasitica* pratique cet échange de *"starships"*, il est loin d'être le seul. Ainsi, lorsqu'un champignon pathogène du blé en rencontre un autre qui ne l'est pas, il peut lui transférer d'énormes éléments contenant des gènes de toxines capables d'infecter le blé. Et provoquer l'émergence d'une nouvelle maladie. Serait-ce l'un des secrets de ces redoutables champignons ? *"Le transfert de gènes par ces éléments mobiles permet en tout cas une adaptation hyper rapide*, constate Tatiana Giraud. *Et pour le moment, seuls les champignons ont montré détenir cette capacité."* ▪

> *"On s'est aperçu qu'il y avait dans le génome de certains champignons pathogènes une grande région qui ne recombine pas"*

* La biodiversité en infographies, l'urgence du vivant : comprendre pour agir, *Tatiana Giraud, Hervé Bouilly et Catherine Huguet, éd. Tana, 2026.*

Dans une plantation du Mecklembourg, en Allemagne, un agent forestier surveille la croissance d'un jeune frêne dont la résistance à la chalarose a été renforcée.

© MARVIN MORIARTY/USFWS - JENS BÜETTNER/DPA/ZUMA/REA

FUSARIOSE LA TERREUR DES BANANES

Entre *Fusarium oxysporum*, champignon responsable de la fusariose, et les cultivateurs de banane, la guerre à mort est déclarée. Qui va l'emporter ? PAR HUGO LEROUX

Savoureuse, sans pépins, bon marché… et partout identique. La banane Cavendish, qui domine le commerce mondial, paie aujourd'hui le prix de son succès. Cette variété est menacée par la fusariose, une maladie provoquée par un champignon du sol capable de coloniser les racines, puis d'obstruer les vaisseaux de la plante jusqu'à la faire dépérir. Sa souche la plus redoutée, TR4, progresse en Asie, en Afrique et en Amérique latine. Pourquoi une telle vulnérabilité ? Parce que toutes les Cavendish sont quasiment des clones d'une même plante, multipliée par bouturage à partir d'un pied mère. *"Elle a été choisie parce qu'elle coche toutes les cases de la commercialisation : le goût, l'absence de graines, le calibre, mais aussi la résistance au transport maritime"*, explique Jean Carlier, chercheur au Cirad. Récoltée verte, la Cavendish supporte en effet plusieurs semaines de bateau avant de mûrir sans brunir trop vite. Cette uniformité génétique constitue pourtant son talon d'Achille. *"C'est un boulevard pour les pathogènes : s'ils touchent une plante, ils peuvent potentiellement contaminer toute la plantation"*, poursuit le chercheur.

Et la fusariose est un adversaire particulièrement coriace. Contrairement aux maladies qui touchent les feuilles, elle se

© KATERYNA KON/SPL

développe dans le sol, sur lequel les traitements fongicides n'ont pas prise. Face à cette menace, chercheurs et producteurs explorent plusieurs pistes. La première repose sur les croisements classiques. Les sélectionneurs repartent de bananiers sauvages ou anciens, fertiles et porteurs de graines. *"On repart d'ancêtres qui présentent une résistance à TR4"*, précise Jean Carlier, qui coordonne le programme Bana+ mené avec des producteurs antillais. Mais le processus est long, car il faut obtenir un fruit goûteux, sans graines, productif et compatible avec les contraintes de l'exportation. *"Du laboratoire aux essais en plein champ, développer une variété peut prendre plus de dix ans"*, résume-t-il.

Trois nouvelles variétés résistantes à la fois à la fusariose et à une autre maladie fongique, la cercosporiose noire, sont aujourd'hui en cours d'évaluation aux Antilles. Mais les producteurs avancent prudemment. Une tentative précédente, la Pointe d'or, a échoué, car elle brunissait trop vite sur les étals, ce qui avait rebuté les consommateurs.

LA VOIE GÉNOMIQUE

Une autre voie très explorée passe par l'édition du génome, grâce à des outils modernes comme les ciseaux moléculaires CRISPR. L'idée est cette fois de conserver la Cavendish tout en modifiant certains gènes impliqués dans sa sensibilité au champignon. Mais le procédé n'a rien d'une baguette magique. Modifier un gène peut affecter la croissance de la plante, et rien ne garantit qu'un champignon aussi adaptable que TR4 ne contourne rapidement cette défense. D'où une troisième approche, hybride : *"partir de bananes obtenues par croisements classiques, puis corriger certains défauts, souvent le brunissement, grâce à l'édition génétique"*, pointe Jean Carlier. Reste que l'avenir ne doit pas passer par une nouvelle monoculture mondiale, qui présenterait la même vulnérabilité sanitaire dans le futur. *"Il faut plutôt viser une diversification des variétés, où la Cavendish cohabitera avec d'autres bananes."* Sauver la Cavendish, donc, mais peut-être, et surtout, réapprendre à consommer d'autres types de bananes… ▪

Vue au microscope de *Fusarium oxysporum*: on distingue notamment ses hyphes cloisonnés, et ses macroconidies (spores) en forme de barque.

© ADISHA PRAMOD/ALAMY STOCK PHOTO/HEMIS.FR

Alerte à l'invasion fongique

Au cours de notre histoire, guerres et catastrophes naturelles ont favorisé des famines dues à des champignons. Aujourd'hui, le réchauffement climatique pose de nouveaux défis épidémiques.

PAR CORALIE HANCOK

Culture de *Candida auris*. Ce champignon apparu dans les hôpitaux voici une quinzaine d'années est à l'origine d'une épidémie nosocomiale mondiale.

S'ils causent de véritables hécatombes chez les végétaux, les champignons affectent aussi les humains. Indirectement certes, mais de façon tout aussi létale. Jugez plutôt : à partir de 1845, *Phytophthora infestans*, plus connu sous le nom de mildiou de la pomme de terre, entraîne en Irlande une chute vertigineuse de la production du tubercule. S'ensuit une terrible famine qui tue 1 million de personnes et pousse 1,5 million d'Irlandais à l'émigration. Certes, *Phytophthora infestans* est considéré aujourd'hui comme un "pseudo-champignon" – c'est un oomycète phylogénétiquement plus proche des algues brunes –, mais d'autres "vrais champignons" ont bel et bien contribué à décimer des humains… *Bipolaris oryzae*, qui provoque l'helminthosporiose du riz, est en partie responsable de la famine du Bengale qui, en 1943, tua 3 millions de personnes. Tandis que les champignons du genre *Puccinia*, responsables de la rouille du blé, ont contribué, en plus de facteurs politiques ou climatiques, à plusieurs famines en Europe depuis l'Antiquité jusqu'au XIXe siècle. La menace ne s'est d'ailleurs pas tarie : en 2011, une étude publiée par des chercheurs américains et britanniques estimait que seule 39 % de la population mondiale aurait de quoi se nourrir en cas d'épidémies frappant simultanément riz, blé, maïs, soja et pommes de terre.

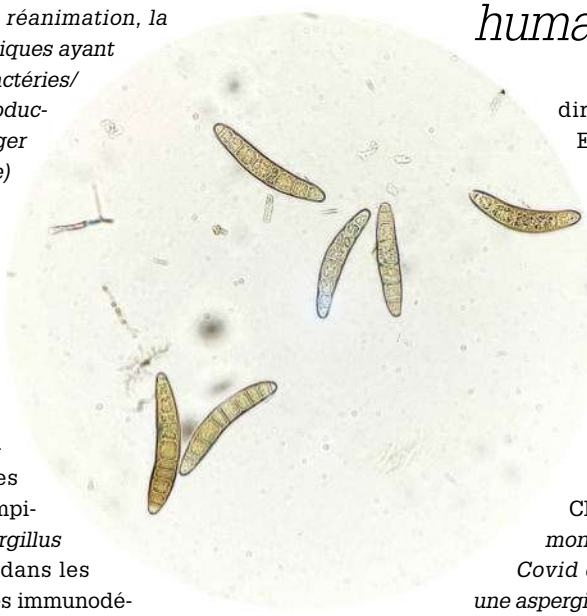
ATTAQUES FRONTALES?

Et quid d'une menace directe ? *"Jusqu'à 25 % de la population humaine mondiale est touchée par des pathologies de la peau et des muqueuses causées par des champignons. Fort heureusement, même si certaines sont invalidantes, elles ne sont pas mortelles"*, répond Sarah Dellière, mycologue à l'hôpital Saint-Louis (Paris) et à l'Institut Pasteur. *"Aucune flambée épidémique meurtrière attribuable à des champignons n'a été rapportée par les historiens"*, confirme Renaud Piarroux, professeur de parasitologie et de mycologie à Sorbonne Université (Paris), auteur de *Sapiens et les microbes. Les épidémies d'autrefois* (CNRS éditions). Il faut dire que la plupart des champignons filamenteux (pluricellulaires) ne sont pas capables de se développer à 37°C. Et quand ils le sont, notre système immunitaire est généralement efficace contre eux. Quant aux

levures (champignons unicellulaires), elles sont au contraire nombreuses à vivre en harmonie avec nous dans notre microbiote.

Sauf que pour certaines personnes, ces champignons inoffensifs peuvent devenir des tueurs. En 2022, l'OMS a établi une liste de 19 agents pathogènes fongiques prioritaires. Parmi eux, *Candida albicans*. *"C'est une levure de notre microbiote intestinal ; mais, chez des patients en réanimation, la prescription d'antibiotiques ayant perturbé l'équilibre bactéries/champignons et l'introduction de matériel étranger (cathéters par exemple) peuvent favoriser son passage dans le sang. On parle de candidémie, et le taux de mortalité avoisine 40 %"*, expose Alexandre Alanio, coresponsable du Centre national de référence sur les mycoses invasives. Autre champignon prioritaire, *Aspergillus fumigatus* s'installe dans les poumons de personnes immunodéprimées (ayant reçu des chimiothérapies ou un traitement immunosuppresseur suite à une greffe d'organe, par exemple) ou souffrant d'une pathologie pulmonaire chronique. Les patients vivant avec le VIH constituent également une population vulnérable, en particulier pour les infections à *Pneumocystis* et à *Histoplasma*. Enfin, même s'il ne s'agit pas d'infections, *"l'exposition aux moisissures dans les logements ou dans certains environnements professionnels peut provoquer des pathologies allergiques"*, indique Anne-Pauline Bellanger, parasitologue et mycologue au CHU de Besançon.

> *"Face au changement climatique, les champignons peuvent s'adapter à la température du corps humain"*



Spores de *Bipolaris oryzae* (ci-dessus), champignon parasite du riz responsable d'une famine en Inde en 1943. À droite, *Phytophthora infestans*, ou mildiou de la pomme de terre, vu au microscope électronique et colorisé.

2,55 MILLIONS DE MORTS

Au total, dans une étude publiée en 2024, David Denning, spécialiste des infections fongiques à l'université de Manchester (Grande-Bretagne), estimait que les maladies fongiques graves affectaient chaque année 6,55 millions de personnes à travers le monde et en tuaient directement 2,55 millions. Et encore, reconnaît-il, ce chiffre est sous-estimé. D'abord, indique-t-il, *"parce que je n'ai pas pris en compte les décès occasionnés lors de la pandémie de Covid-19 ou d'épidémies sévères de grippe"*. Or, souligne Jean-Pierre Gangneux, chef du service de parasitologie-mycologie au CHU de Rennes, *"nous avons montré que, chez les patients Covid en détresse respiratoire, une aspergillose invasive multiplie par deux la mortalité"*. Durant la pandémie, l'Inde a également enregistré plus de 51 000 cas de mucormycose (infection fongique invasive à champignons filamenteux)… contre 10 000 cas par an et dans le monde auparavant !

L'incidence des pathologies fongiques est également sous-évaluée en raison d'un sous-diagnostic, en particulier dans les pays à faible revenu. *"Alors qu'en Guyane, l'histoplasmose constitue la première infection opportuniste chez les patients en stade sida, nos voisins au Surinam ne recensaient officiellement aucun cas. En développant sur place des moyens de diagnostic, il s'est finalement avéré qu'un quart des personnes vivant avec le VIH et hospitalisées pour fièvre avait une histoplasmose. Les cas comme les décès étaient auparavant attribués à la tuberculose"*, souligne Antoine Adenis, professeur de santé publique au CHU de Guyane. L'amélioration du diagnostic explique l'envolée des cas. Mais en partie seulement. *"La médecine moderne,*

© LAORBLACK/SHUTTERSTOCK

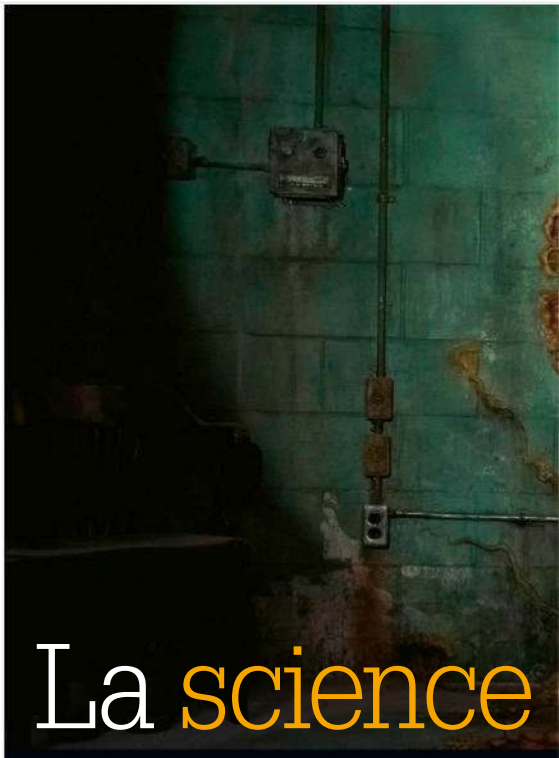
© POWER AND SYRED/SPL

en permettant la survie de patients fragiles et immunodéprimés, a mécaniquement augmenté le nombre de ceux vulnérables aux infections fongiques", souligne Fanny Lanternier, coresponsable du Centre national de référence sur les mycoses invasives.

ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

Enfin, le réchauffement climatique est également en cause. D'abord, en étendant la zone dans laquelle certains champignons peuvent s'épanouir. Par exemple, une étude publiée en 2019 a estimé que, d'ici à 2100, le nombre d'États américains où sévit *Coccidioides immitis* pourrait passer de 12 à 17, faisant croître le nombre de cas de 50 %. *"Le changement climatique augmente aussi la fréquence des événements extrêmes. Or, ceux-ci dispersent les spores de champignons et favorisent leur inhalation ou leur inoculation via les blessures traumatiques qu'ils causent"*, indique Justin Remais, professeur de santé environnementale à l'université de Berkeley (États-Unis).

Après la tornade Joplin au Missouri en 2011, une épidémie de mucormycose a ainsi été observée chez les victimes. Face au changement climatique, les champignons peuvent s'adapter, devenir thermotolérants… et supporter la température du corps humain. *"Nous pensons que c'est ce qui s'est passé pour* Candida auris, *un champignon jusqu'alors inconnu qui a émergé à partir de 2009 et de façon quasi simultanée sur plusieurs continents"*, indique Arturo Casadevall, professeur de microbiologie à l'université Johns-Hopkins (États-Unis). Depuis, il a provoqué plusieurs épidémies hospitalières meurtrières. Ce qui inquiète les médecins, c'est sa facilité à devenir résistant aux antifongiques – problème qui concerne d'autres champignons. *"Il n'existe que cinq classes différentes d'antifongiques, et certains champignons ont développé des résistances à plusieurs d'entre elles"*, déplore Fanny Lanternier. En cause, *"l'utilisation des mêmes molécules antifongiques dans l'agriculture"*. Pour cette raison, Jean-Pierre Gangneux et une cinquantaine d'autres médecins et chercheurs ont signé en mai dernier une tribune dans la revue *Nature Medicine* appelant à réserver les antifongiques en cours de développement à la seule médecine humaine. ▪



La science

Rien de tel qu'un méchant pathogène pour allumer l'imaginaire des scénaristes et des romanciers.

L'œuvre la plus connue ? Probablement *The Last of Us*, jeu vidéo post-apocalyptique sorti en 2013 et adapté en série en 2023 *(ci-dessus)*. On y découvre un monde où un cordyceps, champignon parasitant les insectes, est parvenu à la faveur du réchauffement climatique à infecter les humains et les transforme en zombies. Dans le roman *Celle qui a tous les dons* (éd. Livre de Poche), publié en 2014 par Mike Carey et adapté au cinéma en 2017 sous le titre *The Last Girl*, un ophiocordyceps provoque, lui aussi, une pandémie zombie. Publié juste avant la Covid-19

-fiction se régale !

par l'autrice sino-américaine Ling Ma, le roman *Severance* (*Les Enfiévrés*, éd. Mercure de France) imagine également une pandémie provoquée par un champignon nouvellement apparu… en Chine !

"L'adaptation à l'endothermie humaine via le réchauffement climatique constitue un scénario plausible, comme le montre l'exemple de Candida auris. *En revanche, que des cordyceps franchissent la barrière des espèces et infectent les humains, alors qu'ils sont très spécifiques –chacun ne parasitant qu'une seule espèce d'insecte– me semble impossible"*, commente Sarah Dellière. Quant au risque de pandémie fongique, ajoute la chercheuse, *"il est moins probable qu'une nouvelle pandémie virale, rares étant les champignons capables de transmission directe interhumaine"*.

Au-delà du risque pandémique, les infections fongiques imaginées dans la S.-F. sont parfois plus locales : dans le film japonais Matango (1963, *ci-dessous*), des naufragés se transforment en créatures fongiques après avoir consommé des champignons mutés par des essais nucléaires ; tandis que dans le roman *Mexican Gothic* (éd. Bragelonne, 2021), un réseau mycélien relie mentalement les habitants d'une vieille demeure. Une idée qui rappelle l'hypothèse du *"Wood Wide Web"* selon laquelle les arbres communiqueraient entre eux via les mycorhizes de champignons symbiotiques, et aussi exploitée –de façon moins terrifiante– par James Cameron dans son film *Avatar* (2009).

© HBO - TOHO

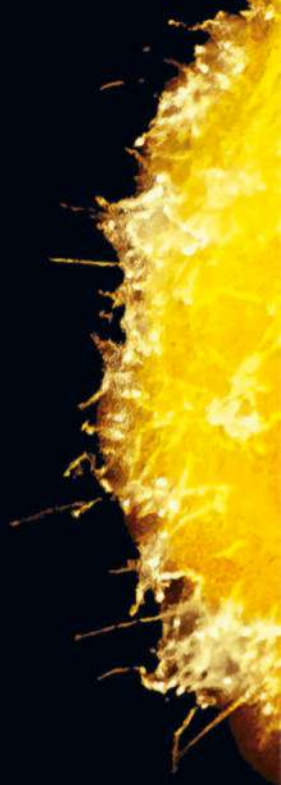
INVENTER

Culture de zinnia en apesanteur, flottant à bord de l'ISS. Testée dans le cadre du projet "Veggie", celle-ci a été infestée par *Fusarium oxysporum*, petit champignon responsable de la fusariose. La microgravité accentuerait le caractère pathogène de certaines moisissures.

© NASA PHOTO/ALAMY/HEMIS.FR

Agriculture
5 super pouvoirs des champignons

Entre mycoremédiation, fertilisation des sols et biocarburants de 2e génération, le roi des sous-bois est promis à un bel avenir. Le point sur les biotechnologies les plus prometteuses pour l'agriculture. PAR RIVA BRINET



Ils dégradent le plastique

Les champignons pourraient-ils s'attaquer à d'autres types de polymères, pas nécessairement végétaux ? Cette question anime la recherche, notamment pour venir à bout des matériaux polluants comme le plastique. *"Conçus par les êtres humains pour être résistants et durables, les plastiques sont pour la plupart des polymères constitués de carbone, avec des structures similaires à celles de la cellulose. Nous cherchons à transposer les capacités des champignons à dégrader des polymères naturels aux polymères artificiels"*, détaille Jean-Guy Berrin, directeur de recherche à l'Inrae dans l'unité biodiversité et biotechnologie fongiques à Marseille. Une étude publiée en 2025 dans *Angewandte Chemie* montre qu'en laboratoires, des enzymes oxydatives impliquées dans l'altération de la lignine ont pu diminuer fortement le degré de polymérisation du polystyrène, le polymère synthétique le plus utilisé au monde. D'autres métalloenzymes, dites LPMO, sont également à l'étude pour fragiliser la liaison carbone-carbone de polymères plastiques récalcitrants.

***Parengyodontium album*, champignon marin, intrigue les chercheurs : des tests en laboratoire ont montré qu'il peut dégrader lentement le polyéthylène, surtout après exposition de celui-ci aux UV du soleil.**

© JOSH MCGINNIS

Vue du ciel, cette usine d'éthanol en construction à Passo Fundo, au Brésil, illustre l'essor des carburants alternatifs. Ici, des levures – des champignons microscopiques – transformeront les sucres végétaux en alcool utilisable comme biocarburant.

© DIEGO VARA/REUTERS

Ils produisent des biocarburants

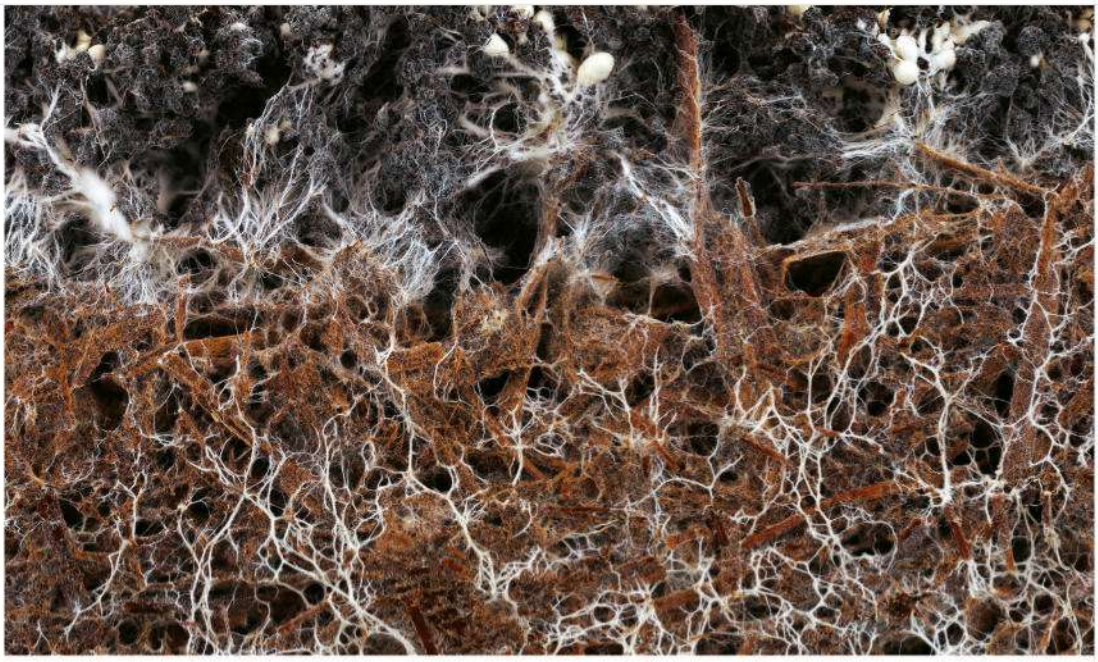
Lors de balades en forêt, vous avez sûrement remarqué ces champignons accrochés aux bois morts. Ce sont des champignons dits "saprophytes", spécialisés dans la dégradation des végétaux. Leur objectif : récupérer le carbone de la matière organique morte et s'en nourrir. Fixés au bois, ils s'attaquent à la paroi végétale, composée d'un réseau de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, le tout relié par de solides liaisons. *"Cette biomasse est récalcitrante. Les champignons saprophytes se sont adaptés en produisant des systèmes enzymatiques complexes capables de la décomposer*, observe Jean-Guy Berrin. *Ce sont des enzymes robustes, d'une grande diversité. Au laboratoire ou à l'échelle industrielle, il suffit de mettre en contact les champignons en présence d'inducteurs, de petites molécules de sucres qui agissent comme un leurre, pour qu'ils sécrètent leurs enzymes."* Un matériel précieux : une fois récupérées, ces enzymes de dégradation de la matière végétale sont étudiées de près, notamment dans le secteur des biotechnologies. Elles sont en effet au cœur de la production des biocarburants dits de "deuxième génération", ceux qui ne sont pas issus de ressources alimentaires.

Les champignons saprophytes abritent près de 10 000 espèces. Pour produire des biocarburants, le plus utilisé est *Trichoderma reesei*, dont les enzymes (des cellulases) sont spécialisées dans la décomposition de la cellulose.

Au Brésil (premier producteur de ces carburants de deuxième génération), les industriels s'en servent pour dénaturer la lignocellulose, un résidu de la canne à sucre.

Mais les scientifiques étudient des enzymes encore plus efficaces que ces cellulases de *Trichoderma reesei* : les enzymes oxydatives, qui portent un métal dans leur centre actif. Deux types de champignons sont à l'étude au laboratoire Inrae de Marseille : *Pycnoporus cinnabarinus*, reconnaissable dans les forêts par sa couleur orange, et plus récemment *Fomitopsis pinicola*, champignon qui pousse sur le pin. Les oxydases qu'ils sécrètent ont l'avantage de dégrader les trois composants de la paroi végétale, et pas uniquement la cellulose. Toutefois, *"les industriels sont encore frileux à utiliser ces nouvelles souches, car ils ont mis beaucoup d'efforts à améliorer les capacités de sécrétion de* Trichoderma reesei. *Celui-ci peut sécréter 1 000 fois plus d'enzymes par litre de culture qu'une souche sauvage"*, souligne Jean-Guy Berrin.

> « Trichoderma reesei *peut sécréter 1 000 fois plus d'enzymes par litre de culture* »



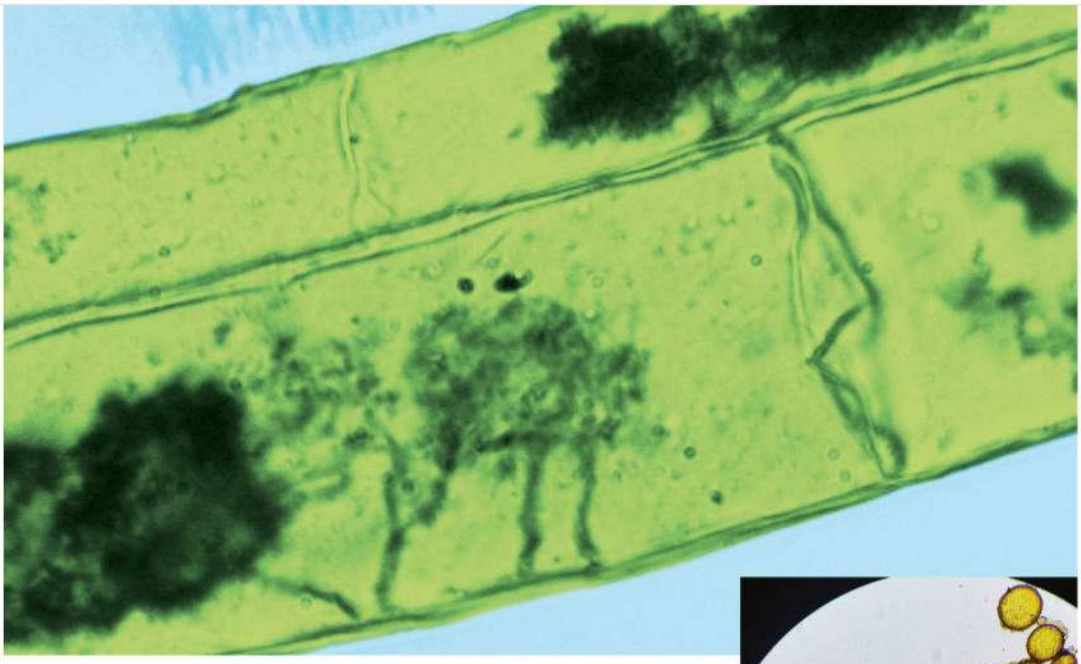
Ils fertilisent les cultures

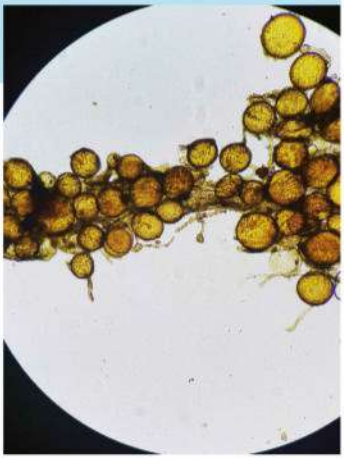
La symbiose mycorhizienne *(photo)*, cette association unique entre des champignons du sol et des plantes, repose sur un système d'échanges bénéfiques aux deux parties : la plante fournit aux champignons symbiotiques des éléments carbonés (sucres, lipides) issus de la photosynthèse ; en échange, le champignon prélève dans le sol de l'eau et des éléments nutritifs (phosphore, azote, potassium) qu'il offre à la plante. *"Nous avons voulu, à tort, remplacer le monde microbien par des intrants chimiques. Il nous faut redonner aux micro-organismes du sol leur fonction primaire de protection et de stimulation des végétaux"*, estime Stéphan Declerck, responsable du laboratoire de mycologie de l'université catholique de Louvain. Pour cela, la recherche scientifique et le secteur industriel se penchent sur les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), des champignons aux filaments ultra-fins (2 à 3 microns), capables de s'étendre en surface et de pénétrer plus profondément que les racines des plantes. *"Ils augmentent la croissance et la biomasse de la grande majorité des espèces d'importance agricole – à l'exception, entre autres, de la betterave"*, précise le professeur.

Le principe consiste à produire ces champignons sur des plantes-pièges, de les récolter sous forme de spores ou de petits fragments racinaires colonisés. Une fois ceux-ci formulés avec des minéraux, l'agriculteur les place dans des semoirs et les répand sur ses terres, en même temps que les graines. Ces techniques, encore coûteuses, sont très intéressantes pour des cultures à forte valeur ajoutée comme les tomates ou les bananes. Elles le sont moins pour le blé, dont les rendements sont déjà maximisés. En culture biologique, le rendement des pommes de terre est augmenté de 5 à 10 % lorsque les CMA sont ajoutés en complément des fertilisants organiques (déchets agricoles, compost, déjections).

Mais en culture conventionnelle, ces biofertilisants fongiques, utilisés en complément d'engrais de synthèse, ne fonctionnent pas aussi bien et mettent à risque les productions. *"Les fongicides, utilisés dans l'agriculture intensive pour combattre les champignons pathogènes, ciblent en même temps ces champignons symbiotiques. Nos pratiques agricoles actuelles ne sont donc pas compatibles avec ces champignons. Un changement de paradigme doit se mettre en place"*, alerte Stéphan Declerck. Le secteur fait face à une autre difficulté : la qualité variable des champignons mycorhiziens à arbuscules proposés sur le marché. Produits sur des plantes-pièges cultivées en serre, c'est-à-dire en milieu ouvert, les inoculums présentent un risque de contenir des espèces indésirables (contaminants, nuisibles). Avec le projet européen AMFACTORY, le laboratoire de mycologie de Stéphan Declerck développe des cultures in vitro d'inoculums afin de s'affranchir du risque de pathogènes. *"Ces solutions sont encore très chères et les niveaux de production des CMA sont moins bons. Notre objectif est de changer d'échelle, de passer de la boîte de Petri au bioréacteur, pour diminuer les coûts"*, explique le chercheur.

© ADOBE STOCK





Dans ces cellules de racines de maïs *(en haut)*, les lignes sombres sont des arbuscules : de fins réseaux formés par des champignons mycorhiziens (*ci-dessus*, vus au microscope). S'ils aident à capter les nutriments essentiels à la croissance de la plante, ils la protègent aussi des maladies.

Ils luttent contre les pathogènes

Grâce à leur rôle symbiotique, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) présentent l'avantage de protéger les plantes vis-à-vis des agressions extérieures. En agriculture, on parle d'une fonction de "biocontrôle", soit contrôler de manière naturelle l'infection par les organismes pathogènes. Le sujet intéresse les chercheurs et le monde agricole, car il pourrait permettre, à terme, d'atteindre l'objectif d'une agriculture "zéro-phyto", sans usage de produits phytosanitaires. Comment les CMA s'y prennent-ils ? *"Une fois la plante colonisée, ils activent un système de défense dit de Résistance systémique induite (ou ISR en anglais) qui active les gènes de défense du végétal. Celui-ci peut répondre alors plus rapidement à une attaque de pathogène"*, explique Stéphan Declerck. Ces champignons mycorhiziens permettent aujourd'hui de réduire de 20 à 40 % l'incidence des maladies comme le mildiou de la pomme de terre ou le botrytis, ces pourritures grises observées notamment sur les fraises. Si ces résultats constituent une belle avancée, ils ne sont pas suffisants pour les agriculteurs. Aujourd'hui, l'usage des CMA en biocontrôle n'est qu'une solution partielle, permettant de réduire les fréquences d'usage et les quantités de pesticides, et non de les remplacer. Ils pourraient être couplés à un autre champignon, *Trichoderma*, efficace pour lutter contre les pathogènes, mais avec d'autres mécanismes d'action. Dans le cas du mycoparasitisme, *Trichoderma* parasite et se nourrit directement du pathogène. Il peut aussi produire des antibiotiques qui contrôlent la croissance des bactéries ou champignons ennemis.

> *« Une fois la plante colonisée, ils activent un système de défense dit de Résistance systémique induite qui active les gènes de défense du végétal »*

© SCIENCE SOURCE/USDA/SCIENCE PHOTO LIBRARY - ADOBE STOCK

Dégradant certains hydrocarbures et piégeant des métaux lourds, le mycélium du pleurote en huître (*Pleurotus ostreatus*) est étudié pour dépolluer les sols.

Ils dépolluent les sols

On appelle cette branche de la science la mycoremédiation. Elle vise à dépolluer les sols en utilisant la capacité des champignons à sécréter des enzymes pour dégrader des molécules complexes (comme pour la production de biocarburants). Les plus étudiés sont les *white-rot fungi*, des champignons saprophytes à pourriture blanche (*Ganoderma*, *Pleurotus*) : ils produisent des enzymes complexes, comme les laccases, aptes à s'attaquer aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Formées lors de la combustion de matières organiques (charbon, pétrole, essence, diesel…), elles se retrouvent aisément dans les sols pollués autour des usines, raffineries, aux abords des routes et des stations-service. Pour dépolluer les sites industriels, les *white-rot fungi* sont dispersés au sol en présence de plantes leur permettant de croître de manière optimale. Efficace, la mycoremédiation a malgré tout des limites : les champignons ne peuvent dépolluer les sols qu'en surface, sur la première dizaine de centimètres, et sur un temps long. Il faut compter une dizaine d'années pour qu'ils arrivent à bout des polluants, si bien que les industriels préfèrent s'en débarrasser eux-mêmes par des méthodes plus expéditives…

> *« Pour dépolluer les sites industriels, les* white-rot fungi *sont dispersés au sol en présence de plantes leur permettant de croître de manière optimale. »*

© EVGENI ROMANOV/SHUTTERSTOCK

MICROMYCÈTES VS MARÉE NOIRE

Certains champignons microscopiques très répandus "dévorent" le pétrole. Ils renforceront bientôt l'arsenal de lutte contre les pollutions aux hydrocarbures. PAR PAULE-ÉMILIE RUY

Dans la discrétion la plus totale, des champignons microscopiques, ou micromycètes, s'activent et se nourrissent volontiers du pétrole délaissé lors des marées noires. Trois moisissures ordinaires sont particulièrement douées pour cette mission. Il aura fallu quatre ans, le temps du projet Mic Giver, pour identifier leurs propriétés miraculeuses de dégradation du pétrole brut. *"Tout a commencé lorsque des scientifiques ont constaté la persistance de micromycètes sur des plages touchées par des marées noires, parfois plusieurs années après les événements, comme sur celles de Portsall, en Bretagne, où le célèbre* Amoco Cadiz *a fait naufrage en 1978",* relate Ronan Jézéquel, chef de projet au Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux, à Brest (Cedre), partenaire du projet Mic Giver. À partir de cette observation, une ambition mûrit : celle d'identifier les espèces fongiques les plus aptes à biodégrader et transformer les hydrocarbures et les employer comme dépolluant écologique.

C'est ainsi que 300 souches différentes de micromycètes ont été ensemencées sur du pétrole brut. Trois d'entre elles se sont particulièrement bien développées : *Penicillium paneum*, *Trichoderma barcinensis* et *Trichoderma citrinoviride*. Grâce à des enzymes spécialisées, elles fragmentent les molécules les plus complexes des hydrocarbures en molécules plus simples, qu'elles utilisent ensuite comme source de carbone pour croître. Ce processus permet la neutralisation des molécules les plus nocives pour l'environnement et en produit de nouvelles, telles que du dioxyde de carbone ou de l'eau, disponibles pour d'autres organismes.

BIOREMÉDIATION

Comme tous les projets de bioremédiation – où le vivant est utilisé pour décontaminer des milieux pollués –, la difficulté réside dans le passage de la théorie à la pratique. *"Les performances observées en milieux contrôlés ne se retrouvent pas toujours en conditions réelles, où les champignons doivent composer avec les conditions environnementales et les communautés microbiennes déjà présentes",* nuance Gaétan Le Floch, microbiologiste et directeur de l'École supérieure d'ingénieurs en agroalimentaire de Bretagne Atlantique, à Brest. Les trois micromycètes identifiés ne seraient donc pas utilisés pour faire disparaître l'intégralité d'une nappe de pétrole. Ils interviendraient plutôt dans un second temps, lorsque le plus gros de la pollution a été retiré manuellement. Leur intérêt réside dans leur capacité à s'attaquer aux résidus d'hydrocarbures infiltrés dans le sol, accélérant ainsi les dernières étapes du nettoyage – ce que les spécialistes appellent le *"polishing"*. Les micromycètes pourraient être directement appliqués sur les sites contaminés, sous forme lyophilisée par exemple. Une fois les hydrocarbures épuisés, ils cesseront de se développer. Reste désormais à démontrer que les trois petits champignons peuvent s'implanter efficacement sur le terrain et transformer leurs promesses de laboratoire en solution opérationnelle. ▪

© CEDRE

Une chercheuse du Cedre dispose le substrat contenant les couches fongiques à l'étude sur une plage bretonne.

Ils poussent comme des champignons !

Et si demain nous cultivions certains de nos matériaux ? Grâce au mycélium, la partie souterraine des champignons, chercheurs et start-up développent des alternatives aux produits animaux ou pétrosourcés. PAR HUGO LEROUX

Des emballages remplaçant le polystyrène. Des panneaux acoustiques ou isolants. Un cuir "vegan" adopté jusque dans l'industrie du luxe… Derrière cette diversité de produits se cache un même organisme : le mycélium, la partie souterraine et fibreuse du champignon. Dans la nature, ce réseau de filaments colonise sols et troncs morts, décomposant la matière organique. Une propriété que chercheurs et industriels apprennent aujourd'hui à détourner pour fabriquer une nouvelle génération de biomatériaux… dont la recette s'avère étonnamment simple : *"Tout ce qu'il faut, ce sont des fibres végétales et du mycélium"*, résume Wilfried Weber, chercheur au Leibniz Institute for New Materials, en Allemagne. Maintenu quelques jours dans une atmosphère humide et tempérée, autour de 25°C, le champignon colonise le substrat végétal. *"On peut presque le faire dans sa salle de bains"*, sourit-il.

© PERMAFUNGI

LES EMBALLAGES

Flacons de parfum, bouteilles de vin ou cosmétiques : les emballages figurent parmi les applications les plus avancées. Plusieurs entreprises, dont Permafungi, proposent déjà des protections moulées capables de remplacer mousses en plastique et polystyrène expansé. Avec un argument : ces emballages sont biodégradables et compostables, contrairement au polystyrène qu'ils ambitionnent de remplacer. Permafungi garantit ainsi des emballages biodégradables en trente jours *(photos de gauche à droite : le substrat végétal ; sa dépose dans les moules ; l'inoculation du mycélium ; l'incubation en moule ; les emballages obtenus)*.

Le résultat n'est pas un matériau "pur" à base de champignon, mais un composite biologique. *"En quelque sorte, le réseau filamenteux du mycélium va agréger les particules du substrat entre elles"*, explique Jean-Emmanuel Aubert, chercheur au Laboratoire des matériaux et durabilité des constructions (LMDC) de Toulouse. À condition de trouver la bonne combinaison : *"Le choix du couple mycélium-substrat est primordial."* Car les différentes espèces fongiques prospèrent plus ou moins bien, et créent différents réseaux selon la nature chimique du support végétal. *"Ce principe ouvre la voie à une grande diversité de matériaux que l'on peut mouler, imprimer en 3D ou assembler plus librement"*, pointe Wilfrid Weber. Avec, en prime, un intérêt environnemental potentiel, puisque la culture du mycélium demande peu d'énergie et valorise des déchets végétaux au bilan carbone déjà faible.

LE DÉFI DES CONTAMINATIONS

Mais derrière les promesses demeure une réalité encore expérimentale. *"Dans le meilleur des cas, on arrive à obtenir un matériau structuré entre cinq jours et une semaine"*, rappelle Jean-Emmanuel Aubert. Une cadence pas toujours compatible avec les standards industriels en vigueur. Autre défi : les contaminations. Spores et moisissures présentes dans l'air peuvent perturber la croissance et imposent un contrôle rigoureux des conditions de culture.

Heureusement, des progrès se profilent pour les prochaines années. Des start-up comme Ecovative aux États-Unis ou Permafungi en Belgique mettent aujourd'hui le paquet pour massifier la production via des entrepôts de grande taille aux conditions de croissance optimisées. Des chercheurs comme Wilfried Weber travaillent de leur côté sur la sélection et l'amélioration des souches de mycélium grâce aux outils de la biologie synthétique. *"Ce qui permet par exemple de programmer des fonctions supplémentaires dans le mycélium afin d'obtenir directement certaines couleurs, ou une plus grande solidité"*, explique-t-il. Enfin, si des souches comme celles de pleurotes ou de reishi sont exploitées de longue date, *"ce ne sont sans doute pas les plus efficaces pour développer des mycomatériaux. Il reste encore une myriade de possibilités à investiguer"*, confie Jean-Emmanuel Aubert, dont des collègues se sont rendus en forêt pour prélever de nouveaux candidats afin d'en étudier le potentiel en laboratoire. *"À ce jour, le règne des champignons a été trop peu étudié par la recherche. Ils nous réservent probablement de très belles surprises à l'avenir"*, conclut le chercheur. ▪

LES BATTERIES

En recherche fondamentale, certains labos explorent la capacité naturelle des champignons à dégrader la cellulose – une longue molécule constitutive du bois – tout en relâchant des électrons. Au laboratoire suisse EMPA *(ci-dessus)*, Gustav Nyström développe ainsi une "biopile" associant champignons et levures, dont les électrodes sont imprimées à partir d'encres conductrices contenant du carbone *(ci-dessous)*. L'idée : produire une source d'énergie éphémère, mais compostable, capable d'alimenter demain des capteurs environnementaux destinés au suivi de la santé des sols ou à l'agriculture de précision. Si la technologie est encore balbutiante et ne génère que des puissances électriques modestes, elle préfigure une future électronique fongique.

© EMPA

LE CUIR

Le "cuir" de champignon fascine l'industrie de la mode. Dès 2022, Stella McCartney dévoilait son sac Frayme Mylo, conçu avec la start-up Bolt Threads à partir de mycélium cultivé en laboratoire. Hermès a travaillé de son côté avec MycoWorks et son cuir Sylvania, utilisé pour une version du sac Victoria. Le cuir mycélien intéresse aussi des marques plus grand public : Adidas ou Lululemon ont ainsi exploré ces matériaux pour leurs chaussures ou leurs accessoires.

LES PANNEAUX

Isolation thermique, protections acoustiques ou éléments décoratifs : le bâtiment constitue un autre terrain prometteur, bien qu'encore expérimental. Au LMDC, Jean-Emmanuel Aubert explore la possibilité de fabriquer des panneaux que leur faible densité et leur porosité rendraient tout indiqués pour l'isolation et l'absorption acoustiques *(ci-dessus)*. L'esthétique brute de certains mycomatériaux inspire aussi designers et architectes pour du mobilier d'intérieur. Relativement fragiles, ces matériaux restent toutefois loin de pouvoir remplacer des éléments porteurs comme les murs ou les structures de bâtiment.

© PERMAFUNGI

Bientôt un ordi shiitaké ?

Des chercheurs ont franchi une nouvelle étape vers l'informatique vivante. En utilisant le mycélium du shiitaké, ils ont fabriqué des "memristors fongiques"…

PAR DAVID MARCHAND

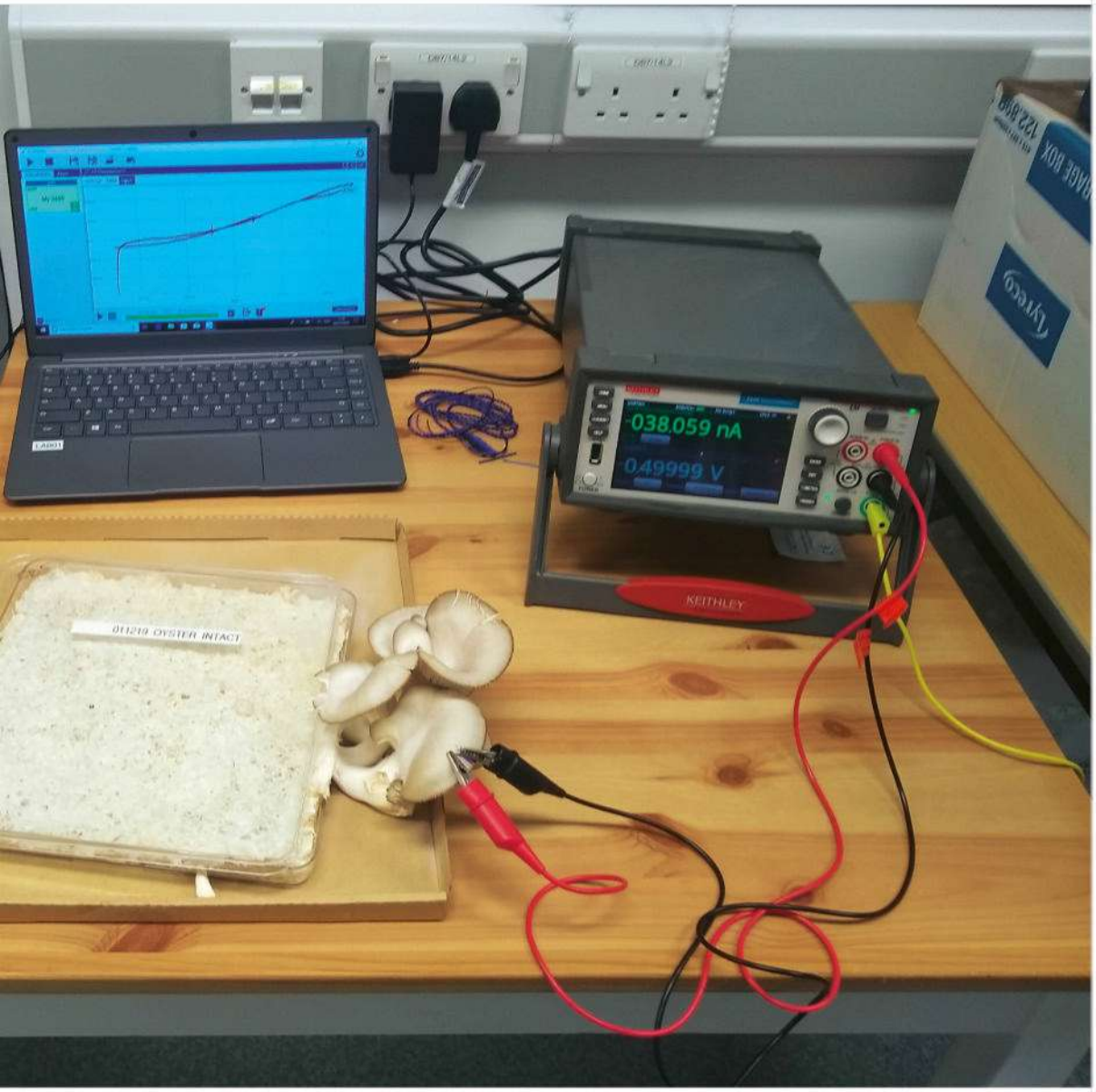
Les champignons possèdent une capacité à stocker l'information en modifiant leur résistance électrique", explique John LaRocco, principal auteur de l'étude et ingénieur à l'Ohio State University. Selon lui, *"nous en sommes aujourd'hui au même stade que les premiers dispositifs à semi-conducteurs des années 1950"*. Leur atout ? Ils nécessitent peu d'énergie, produisent peu de chaleur et peuvent être cultivés sur de simples substrats organiques. Mais peut-on réellement parler d'ordinateur à champignons ? Pour le comprendre, nous avons interrogé Andrew Adamatzky, pionnier du calcul fongique à l'université de l'Ouest de l'Angleterre, à Bristol.

SVHS : les "memristors fongiques" sont-ils le début de l'informatique vivante ?

Andrew Adamatzky : Ces travaux sont passionnants, car ils exploitent une propriété remarquable du mycélium, sa capacité à conserver une trace des stimulations qu'il a reçues. Lorsqu'un courant électrique le traverse, sa résistance peut être modifiée. L'information est alors stockée directement dans l'état physique du réseau fongique, et non dans une puce distincte. Cela ouvre la voie à de nouveaux composants bioélectroniques.

SVHS : Peut-on réellement parler de calcul lorsqu'on parle de champignons ?

A. A. : Oui, mais pas au sens habituel du terme. Le mycélium ne fait pas tourner de programmes et ne manipule pas de symboles comme un ordinateur classique. Il transforme des stimuli comme la lumière, la température ou des contraintes mécaniques en signaux électriques. Ces signaux se propagent dans le réseau et interagissent



À l'UCL (Unconventional Computing Laboratory) de l'université de l'Ouest de l'Angleterre, à Bristol, les chercheurs analysent l'activité de "memristors fongiques".

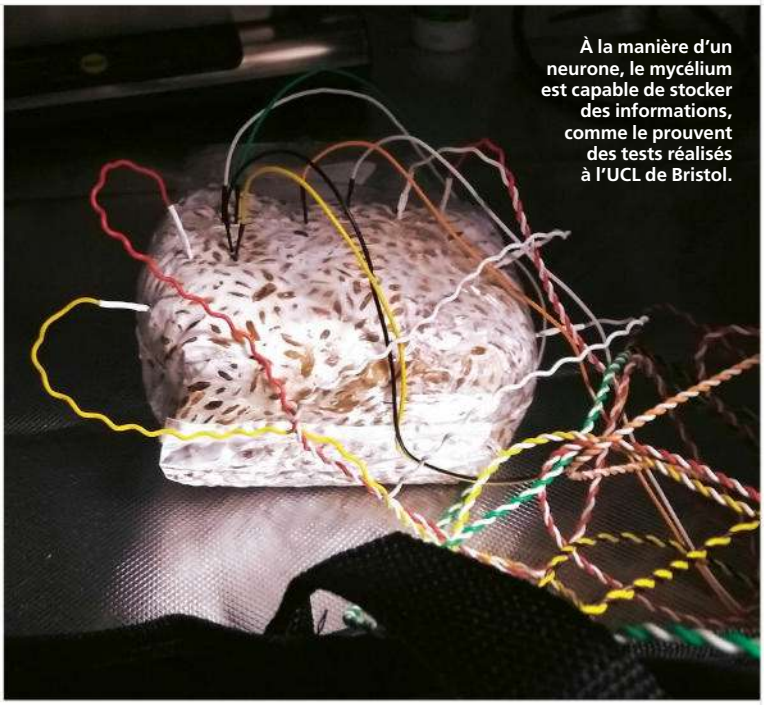
entre eux. Nous avons montré qu'ils pouvaient produire différentes réponses selon les entrées reçues et même réaliser certaines opérations logiques élémentaires. Certaines de ces fonctions sont dites universelles, c'est-à-dire qu'elles pourraient, en théorie, être combinées pour construire n'importe quel circuit logique.

SVHS : Peut-on comparer les signaux électriques des champignons à ceux d'un cerveau ?

A. A. : Il existe des ressemblances, mais aussi des différences fondamentales. Comme les neurones, les cellules fongiques sont capables de générer une activité électrique. Les signaux apparaissent sous forme d'impulsions ou d'oscillations qui se propagent dans le réseau. Mais les champignons ne possèdent ni neurones, ni synapses, ni circuits spécialisés comparables à ceux d'un cerveau animal. Ce qui est

© UNCONVENTIONAL COMPUTING LABORATORY UWE BRISTOL UK

intéressant, c'est que leur réseau peut conserver une trace de certaines stimulations passées. Lorsqu'il est sollicité à plusieurs reprises, sa conductivité peut se modifier. Certaines voies deviennent alors plus faciles à emprunter que d'autres. Cette forme de mémoire physique rappelle, dans une certaine mesure, la plasticité observée dans les réseaux neuronaux. Il ne s'agit pas d'intelligence au sens humain du terme, mais d'une capacité d'adaptation du matériau vivant lui-même.



À la manière d'un neurone, le mycélium est capable de stocker des informations, comme le prouvent des tests réalisés à l'UCL de Bristol.

SVHS : ***Quels sont aujourd'hui les principaux obstacles au développement de l'ordinateur fongique ?***

A. A. : Les défis sont nombreux. Les champignons sont des organismes vivants : chaque réseau se développe différemment, ce qui complique la fabrication de dispositifs reproductibles. Nous ne comprenons pas encore parfaitement les mécanismes à l'origine de leurs signaux électriques et, surtout, ils sont très lents comparés à l'électronique moderne. Là où un processeur travaille en nanosecondes, les réponses d'un champignon se comptent souvent en secondes ou en minutes. C'est pourquoi je ne pense pas qu'ils remplaceront les ordinateurs classiques. Leur intérêt réside plutôt dans le développement de nouvelles formes de calcul où l'adaptabilité et la sobriété énergétique sont plus importantes que la vitesse.

> *« Avec les champignons, il ne s'agit pas d'intelligence au sens humain du terme, mais d'une capacité d'adaptation du matériau vivant lui-même »*

SVHS : ***Alors, quelles applications pourraient-ils avoir ?***

A. A. : Parce qu'il s'agit de matériaux vivants, ils peuvent être directement intégrés à leur environnement. On peut imaginer des systèmes capables de surveiller l'état d'une forêt, ou l'apparition de fissures dans des bâtiments ou des ponts. Le domaine aérospatial est également un débouché intéressant, car la légèreté de ces biocomposants et leur résistance aux radiations y constituent des atouts majeurs. Plus largement, les champignons nous montrent que le traitement de l'information n'est pas réservé aux cerveaux ni aux puces électroniques. Des réseaux biologiques dépourvus de neurones peuvent eux aussi percevoir leur environnement, mémoriser certains événements et produire des réponses adaptées. C'est peut-être là la découverte la plus fascinante. ▪

© UNCONVENTIONAL COMPUTING LABORATORY UWE BRISTOL UK

ABONNEZ-VOUS À SCIENCE&VIE EN PROFITANT DE

La meilleure offre de l'année

5€99/mois

Sans engagement

soit -54%

+ EN CADEAU
Votre montre connectée

Inclus dans votre abonnement :

- 12 numéros + 6 hors-séries.
- Version numérique à consulter sur **KiosqueMag.com**
- Accès illimité au site et à SCIENCE&VIE TV
- Podcasts de nos journalistes.
- Accès à La Science en direct, visioconférence animée par la rédaction.
- **EN CADEAU** Votre montre connectée multifonctions : Appels • Podomètre • Monitoring sport et sommeil • Mesure fréquence cardiaque, tension artérielle, taux d'oxygène • Contrôle de la musique et déclencheur photo

PROFITEZ-EN
en flashant le QR code ci-dessus ou rendez-vous sur bit.ly/svhs-327

Bulletin d'abonnement à compléter et à retourner sous enveloppe affranchie à : Service abonnements Science & Vie - 59898 Lille Cedex 9

M030 # D1654649

① Je choisis la formule d'abonnement (je coche la case) :

☐ **Formule mensuelle intégrale :** 1 numéro par mois + 1 hors-série tous les 2 mois + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) **+ la montre connectée en cadeau** (1)

5€99 les 6 premiers mois au lieu de ~~13,03€~~* **-54%**

Je résilie quand je le souhaite. Je paie 5,99€/mois les 6 premiers mois puis 6,99€/mois les 6 mois suivants. Après la première année, je serai prélevé de 7,50€/mois.

☐ **Formule annuelle intégrale :** 12 numéros + 6 hors-séries + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) **+ la montre connectée en cadeau** (2)

79€ au lieu de ~~156,35€~~* **-49%**

☐ **Formule annuelle basique :** 12 numéros + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) (3)

65€ au lieu de ~~113,64€~~* **-42%**

Mon abonnement se renouvellera automatiquement à date anniversaire sauf résiliation de ma part.

② Je choisis le mode de paiement :

Par prélèvement automatique :
je complète l'iban ci-dessous à l'aide de **mon Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B) à joindre.**

IBAN :

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de Reworld Media Magazines. Créancier : Reworld Media Magazines 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux - France. Identifiant du créancier : FR 05 ZZZ 489479

Date : ☐☐/☐☐/☐☐

Date et signature obligatoires

Par carte bancaire :
je me rends sur KiosqueMag.com : bit.ly/svhs-327
La boutique officielle de Science & Vie.
Plus simple, plus rapide, 100% sécurisé !

SCANNEZ-MOI !

Par chèque (formules annuelles uniquement) :
je renvoie le coupon accompagné de mon chèque libellé au nom de Science & Vie (sans agrafe, ni scotch) à : Science & Vie Service abonnement - 59898 Lille Cedex 9

③ Je complète les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement :

** À remplir obligatoirement.

Nom** : Prénom** :

Adresse**:

CP** : Ville**:

Date de naissance : ☐☐/☐☐/☐☐☐☐ (pour lui fêter son anniversaire) Tél. (portable de préférence) : ☐☐ ☐☐ ☐☐ ☐☐ ☐☐ (envoi d'un SMS en cas de problème de livraison)

Email :

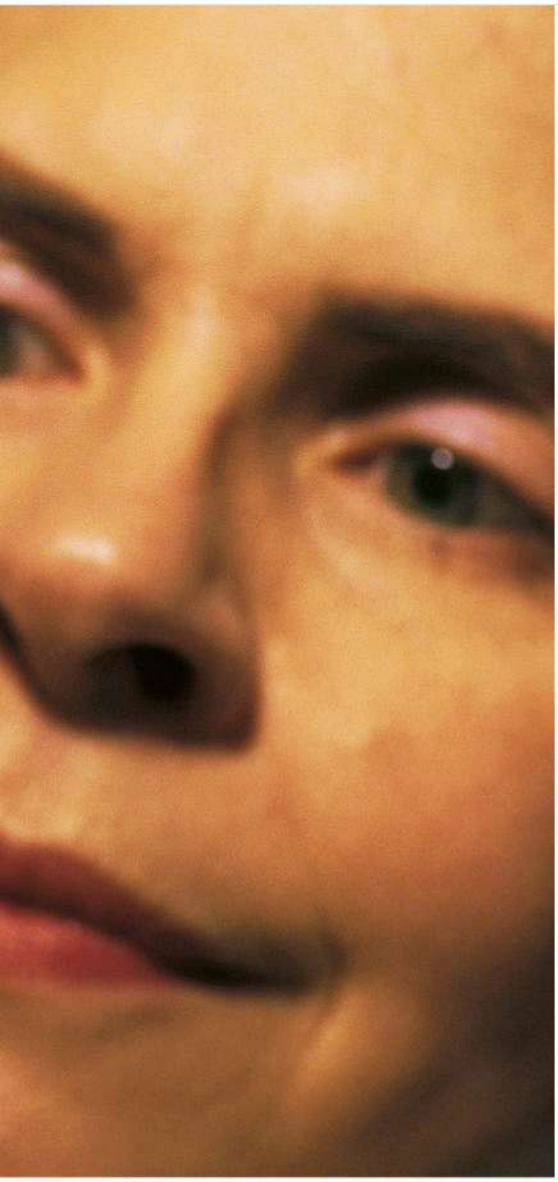
☐ Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège Science&Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. Dommage !

☐ Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage !

*Le prix de référence à l'année de la formule sans hors-série se compose du prix kiosque (63,60€), des frais de port (8,64€), du site internet (41,40€). Le prix de référence à l'année de la formule avec hors-série se compose du prix kiosque (105€), des frais de port (9,95€), du site internet (41,40 €). (1) Formule mensuelle sans engagement : je peux résilier à tout moment sur simple appel ou par courrier au service client. La montre connectée sera expédiée à compter du 3e prélèvement. Après 1 an, je serai prélevé de 7,50€ par mois. (2)(3) Formules annuelles avec engagement : abonnement automatiquement reconduit à date d'anniversaire. Le règlement s'effectue en une seule fois. Vous serez informé par écrit dans un délai de 3 mois avant le renouvellement de votre abonnement. Vous aurez la possibilité de l'annuler 30 jours avant la date de reconduction auprès du service client. A défaut l'abonnement sera reconduit pour une durée identique à votre abonnement initial. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur kiosquemag.com et contacter le service client par mail sur serviceabomag.fr ou encore par courrier à Reworld Media Magazines - Service Client - 40 avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux. Offre réservée aux nouveaux abonnés en France Métropolitaine valable jusqu'au 31/10/2026. DOM-TOM et autres pays nous consulter. Le visuel de la montre connectée est non contractuel.

Le(s) produit(s) vous seront adressés dans un délai de 4 semaines après réception de votre règlement et dans la limite des stocks disponibles. Visuels non contractuels. Vous disposez, conformément à l'article L. 221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Le coût du renvoi de(s) produit(s) est à votre charge. Responsable de traitement des données personnelles : Reworld Media Magazines SAS. Finalités du traitement: gestion de la relation client, opérations promotionnelles et de fidélisation. Données postales et téléphoniques susceptibles d'être transmises à nos partenaires. Conformément à la Loi informatique et Libertés du 6-01-78 modifiée, vous pouvez exercer vos droits d'opposition, accès, rectification, effacement, portabilité, limitation à l'utilisation de vos données ou donner vos directives sur le sort de vos données après décès en écrivant à Reworld Media-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux cedex, ou par mail à dpd@reworldmedia. com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur kiosquemag.com.

Les vrais colons de l'espace



À bord de l'ISS, les champignons font partie des intrus les plus tenaces. Mais ils pourraient aussi devenir les meilleurs alliés des astronautes dans les futures missions spatiales… PAR ADRIEN DENÈLE

À bord de l'ISS, des zinnias cultivés en micropesanteur *(ci-dessous)* ont été touchés par *Fusarium oxysporum*, ici en boîte de Petri *(à gauche)*. Ce champignon perturbe la circulation de l'eau dans les tiges.

GALÈRE FONGIQUE EN APESANTEUR

Sur terre, les champignons pullulent. Dans l'air que nous respirons, sur notre peau, dans notre microbiote ou sur les surfaces qui nous entourent. Contrairement à ce que l'on pourrait imaginer, une station spatiale n'échappe pas à cette règle. *"Du champignon, il y en a partout"*, rappelle Anne Debourgogne, mycologue au laboratoire Simpa (Stress immunité pathogènes, université de Lorraine). *"Garder un milieu totalement stérile est très complexe. Dans l'espace, cela me semble quasiment impossible."*

Depuis les premières stations soviétiques jusqu'à l'ISS, la Station spatiale internationale, les astronautes doivent composer avec ces passagers clandestins. Au fil des années, la station a développé ainsi son propre écosystème microbien. Plus elle vieillit, plus elle accumule de micro-organismes issus des différents équipages et du matériel acheminé depuis la Terre. *"Plus la station va être âgée, plus elle aura connu de turnovers matériel et humain, plus elle se chargera de micro-organismes"*, souligne Anne Debourgogne. Une situation tout à fait banale pour n'importe quelle salle de bains… Sauf que dans l'espace, impossible d'ouvrir les fenêtres ou de procéder à certaines opérations de décontamination lourdes ! Les méthodes utilisées dans les hôpitaux, qui reposent parfois sur des gaz désinfectants corrosifs, sont malheureusement incompatibles avec une station

© KEITH WELLER/ US DEPARTMENT OF AGRICULTURE/SPL - UPI/ALAMY /HEMIS.FR

Sur les murs de l'ISS *(ci-dessus),* des moisissures se développent constamment. L'occasion pour les chercheurs de tester leur résistance aux rayons cosmiques. Résultat : les spores d'*Aspergillus niger* peuvent survivre à des doses de rayonnement de 500 grays à 1000 grays, là où 5 grays sont mortels pour l'homme.

occupée en permanence. Résultat, après vingt-cinq années d'existence, des moisissures ont été retrouvées sur les parois de la station, dans les systèmes de ventilation, sur les joints ou encore à proximité des équipements électroniques. Certaines espèces dégradent les plastiques et les polymères, d'autres peuvent provoquer allergies et infections chez des membres d'équipage, dont le système immunitaire est fragilisé par les longs séjours en microgravité…

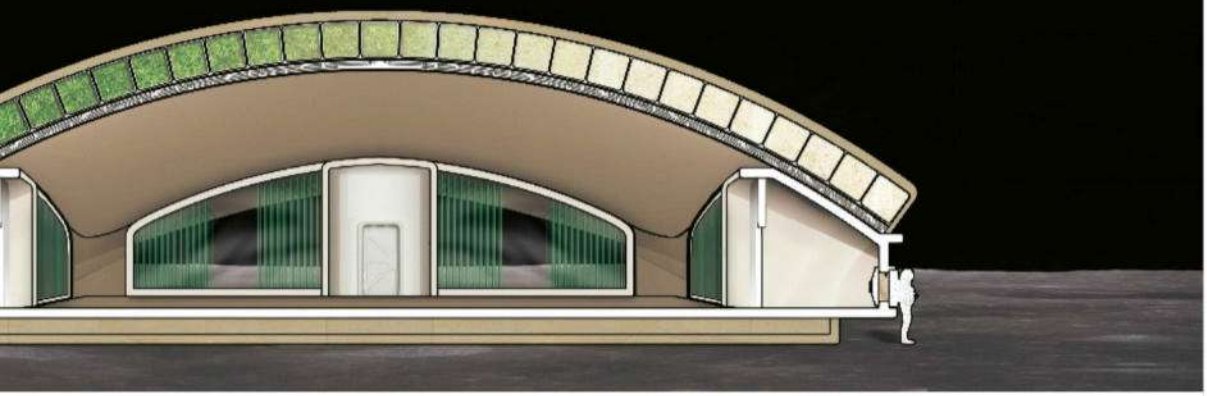
Mais il y a pire. En 2015, le projet "Veggie" tente un pari audacieux : faire pousser à bord de l'ISS des zinnias (*Zinnia hybrida*), une plante mexicaine réputée pour sa robustesse et la couleur vive de ses fleurs. Il s'agissait de tester les conditions de culture de cette variété en orbite, afin d'évaluer la possibilité que les astronautes puissent un jour cultiver leur propre nourriture. Mais les fleurs tombent malades. En cause : *Fusarium oxysporum*, un champignon bien connu des agriculteurs ! Or, les futures bases lunaires ou martiennes devront probablement produire une partie de leur alimentation sur place. Tomates, laitues ou autres végétaux cultivés sous serre pourraient devenir essentiels à la survie des colons. *"Si vous avez ce fameux* Fusarium *qui se met à infecter toute votre plantation de tomates, on peut dire adieu aux ressources pour l'équipe qui pensait se nourrir à partir de ces cultures"*, avertit Anne Debourgogne.

Comment s'en défendre ? Au sein du laboratoire Simpa, la chercheuse et ses collègues étudient l'impact de la microgravité simulée sur certains champignons pathogènes. Parmi eux figure *Fusarium*. *"Ce que nous voulons regarder, c'est l'effet : comment est-ce que le champignon se modifie pour être plus dangereux ou pas ? Pour l'instant, nos recherches montrent que* Fusarium *a l'air plus pathogène en microgravité simulée"*, explique Anne Debourgogne. Les données obtenues in situ, en milieu spatial, sont toutefois encore limitées. Les expériences spatiales sur les champignons sont compliquées à mettre en œuvre, notamment parce qu'il est risqué d'envoyer délibérément des organismes potentiellement pathogènes dans un environnement habité. Cela pourrait pourtant devenir indispensable dans le futur.

© NASA (x3)

BRIQUES MARTIENNES DE MYCÉLIUM

Les champignons pourraient peut-être permettre de construire des bâtiments sur Mars. Au NASA Ames Research Center, l'équipe de Lynn Rothschild développe le concept de "mycotecture" : des habitats produits à partir de mycélium, le réseau de filaments souterrains qui constitue la partie végétative des champignons. Le principe consiste à envoyer des spores et quelques nutriments plutôt que des tonnes de matériaux de construction. Une fois sur place, les champignons se développent et forment progressivement un matériau léger, isolant et relativement résistant (*ci-contre*, des briques ; *ci-dessous*, le toit). À long terme, ces structures pourraient même intégrer des fonctions biologiques supplémentaires : recyclage des déchets, production de biomasse ou autoréparation partielle.



LEÇONS DE SURVIE À MÉDITER

Si les champignons inquiètent les spécialistes, c'est aussi parce qu'ils possèdent une extraordinaire capacité d'adaptation. On les retrouve dans des déserts, des environnements hypersalins, les profondeurs océaniques ou encore des zones irradiées. À Tchernobyl, les chercheurs ont découvert des champignons noirs poussant sur les parois très radioactives du réacteur n° 4 *(ci-contre)*. Ils ont identifié *Cladosporium sphaerospermum (en médaillon)*, une espèce riche en mélanine capable de prospérer dans ces conditions extrêmes. Cette étonnante résistance a attiré l'attention des agences spatiales. Lors d'une expérience menée à bord de l'ISS en 2020, une fine couche de *C. sphaerospermum* a réduit légèrement le rayonnement mesuré derrière elle. Le gain reste modeste, mais il suggère qu'un revêtement vivant, capable de croître et de s'autorégénérer, pourrait un jour compléter les protections contre les radiations cosmiques lors des voyages vers Mars. Seul souci : il déploie des spores partout dans l'habitat ! Mais, comme nous le rappelle un chercheur : *"On ne peut pas avoir les avantages des champignons sans leurs inconvénients !"*

© EPA - UNIVERSITÉ D'ADELAÏDE

N°229
Ulysse, révélations sur le mythe. Ce que le science nous apprend sur le héros absolu

N°228
Encyclopédie. Le livre qui a changé le monde

N°227
Du feu au nucléaire, L'ÉNERGIE, comment elle a façonné nos sociétés

N°226
Les mythes au crible de la science : Prométhée, Gilgamesh, Le déluge, Arjuna...

N°225
Des abysses aux étoiles EXPLORER. L'ingéniosité, moteur des conquêtes

N°224
La folle histoire de l'atome. De la poussière des grecs à la fission du monde

N°223
45 balades archéologiques en France. Quand la science revisite l'histoire

N°219
École et religion. Les liaisons dangereuses

N°218
Drogue. Comment elle a fait et défait notre histoire

N°217
Sociétés secrètes. Aux origines du complotisme américain

N°216
Impressionnisme. Les secrets d'une révolution

STOCKS LIMITÉS !

Commandez dès aujourd'hui vos exemplaires manquants.

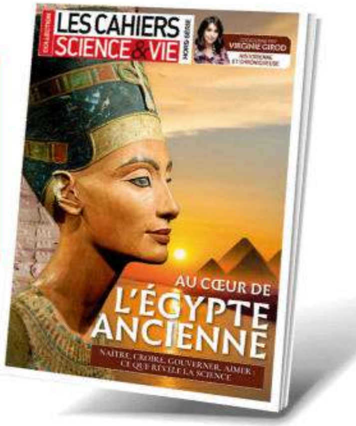
RETROUVEZ NOS ANCIENS NUMÉROS SUR **www.kiosquemag.com**

DÉCOUVREZ LES NOUVEAUX OUVRAGES

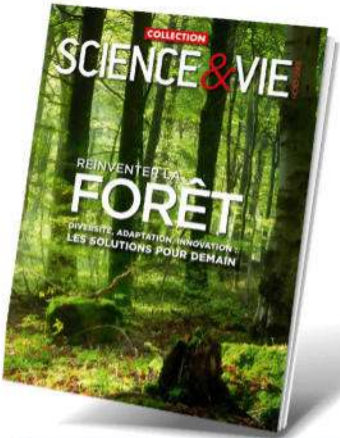
Au cœur de l'Égypte ancienne : naître, croire, gouverner, aimer

Religion, pouvoir, médecine, vie quotidienne, condition féminine : cet ouvrage explore l'Égypte ancienne en cinq parties, des rites funéraires aux chantiers monumentaux. Dossiers sur Ramsès II, Akhénaton, Hatchepsout, Néfertiti et Cléopâtre, entretiens d'experts et décryptages d'idées reçues, pour un **Hors-série exceptionnel éclairé par l'archéologie, l'histoire et la science.**

flashez ce code POUR COMMANDER



- Hors-série Les Cahiers Science&Vie au prix de **19,90€ seulement**
- Couverture cartonnée rigide ▸ 148 p. ▸ Dimensions : 19,5 x 27 cm



DES OUVRAGES À COMMANDER UNIQUEMENT SUR
WWW.KIOSQUEMAG.COM/BOUTIQUE

Réinventer la forêt

Les chênaies aux forêts de demain, découvrez un écosystème en pleine mutation. Face au réchauffement climatique, les scientifiques observent, mesurent et imaginent des solutions pour préserver ce précieux réservoir de biodiversité. **Un ouvrage richement illustré pour comprendre la forêt d'aujourd'hui et les défis qui l'attendent.**

flashez ce code POUR COMMANDER

- Hors-série Science&Vie au prix de **19,90€ seulement**
- Couverture cartonnée rigide ▸ 148 p. ▸ Dimensions. : 19,5 x 27 cm

POUR COMMANDER ET S'INFORMER

Par courrier : Renvoyez le bon de commande avec votre règlement à : **La Boutique Les Cahiers de Science&Vie - 59898 Lille Cedex**

Par téléphone au **01 46 48 48 03** du lundi au samedi de 8h à 20h. (paiement par CB uniquement)

Retrouvez plein d'autres produits sur : **https://www.kiosquemag.com**

BON DE COMMANDE

Retournez ce bon à La Boutique Les Cahiers de Science & Vie - 59898 Lille Cedex 9

N°	Réf.	Qté	N°	Réf.	Qté	Prix unitaire	Sous-total
216	614 043	X	225	617 170	X	7€90	
217	614 236	X	226	617 747	X		
218	614 395	X	227	618 282	X		
219	614 587	X	228	618 806	X		
223	616 265	X	229	619 382	X		
224	616 764	X					
						SOUS-TOTAL	€
FRAIS D'ENVOI (cochez la case de votre choix)			☐ Inférieur à 13€ en envoi normal				3€
			☐ Supérieur à 13€ en envoi normal				5€
						TOTAL GÉNÉRAL	€

Je règle par chèque libellé à l'ordre des Cahiers de Science&Vie.
Vous souhaitez régler par carte bancaire ? Rendez-vous sur **www.kiosquemag.com**
c'est rapide, simple et 100% sécurisé !

Kiosque Mag — Disponible sur kiosquemag.com

Mes coordonnées : ❏ Mme ❏ M. (* À remplir obligatoirement) **# M090 # V 1662691**

Nom* |___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|

Prénom* |___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|

Adresse* |___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|

___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|

CP*|___|___|___|___|___|Ville*|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|

|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|

Email |___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|___|
(indispensable pour le suivi de mon abonnement et recevoir la version numérique)

Téléphone portable |___|___| |___|___| |___|___| |___|___| |___|___|

Date d'anniversaire |___|___| |___|___| |___|___|___|___|

☐ Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège des Cahiers de Science & Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. Dommage !

☐ Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage !

Offre valable en France Métropolitaine jusqu'au 31/12/2026. Conformément à l'article L 221-18 du code de la consommation, vous disposez d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception de votre commande et vous pouvez nous retourner votre colis dans son emballage d'origine complet. Les frais d'envoi et de retour restent à votre charge. Responsable de traitement des données personnelles : Reworld Media Magazines SAS. Finalités du traitement : gestion de la relation client, opérations promotionnelles et de fidélisation. Données postales et téléphoniques susceptibles d'être transmises à nos partenaires. Conformément à la Loi informatique et Libertés du 6-01-78 modifiée, vous pouvez exercer vos droits d'opposition, accès, rectification, effacement, portabilité, limitation à l'utilisation de vos données ou donner vos directives sur le sort de vos données après décès en écrivant à Reworld Media-DPD, c/o service juridique, 40 Avenue Aristide Briand 92220 Bagneux ou par mail à dpd@rewordlmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur kiosquemag.com.

Bibliographie

À LIRE

LES CHAMPIGNONS DE L'APOCALYPSE

D'Audrey Dussutour, éd. Grasset, 2025, 368 p., 23 €.

Et si *The Last of Us* n'était pas si loin ? Audrey Dussutour ouvre ce livre comme une fiction apocalyptique : un champignon parasite gagne du terrain. Mais derrière le frisson, tout est scientifiquement juste. La chercheuse du CNRS y raconte par la voix de Laure, mycologue, le monde fascinant des champignons manipulateurs, de leur origine aquatique à leur incroyable évolution d'où est issu *Cordyceps* ou le redoutable ergot du seigle. Ces parasites qui bouleversent insectes, plantes ou animaux sont au cœur d'une narration vive qui explore, sans jargon, ces maîtres discrets du vivant.

LES MYCORHIZES. L'ESSOR DE LA NOUVELLE RÉVOLUTION VERTE

De J. André Fortin, Christian Plenchette et Yves Piché, éd. Quae, 2016, 184 p., 26 €.

Sous nos pieds, une révolution silencieuse relie racines et champignons. Ils dialoguent entre eux, troquent l'eau et les nutriments puisés dans le sol contre les sucres fournis par la photosynthèse. Un contrat gagnant-gagnant qui montre comment ces symbioses, vieilles de centaines de millions d'années, aident les plantes à se nourrir, résister et coloniser les milieux. De l'horticulture à l'agriculture, de la forêt aux sols abîmés, l'ouvrage explique comment en tirer parti sans rompre les équilibres naturels.

10 CHAMPIGNONS QUI ONT CHANGÉ LA VIE DES HOMMES

De Hubert Voiry, éd. Actes Sud, 2025, 144 p., 15 €.

Un petit livre qui se lit comme un essai, écrit par un ingénieur forestier et mycologue passionné. Dès la préhistoire, l'être humain a repéré et mis à profit les propriétés chimiques des champignons pour faire du feu, se nourrir, préparer du pain ou des boissons alcoolisées. Amanite, amadou, chaga, polypore… Certains ont contribué à envoyer les "sorcières" au bûcher, quand d'autres ont soigné nos blessures. Tous ont joué un rôle central dans l'essor de nos sociétés.

CHAMPIGNONS

De Serge Schall, éd. Terre vivante, 2025, 176 p., 27 €.

Qu'est-ce que la mycorhize ? Combien existe-t-il de champignons en France ? Pourquoi les amanites sont-elles dangereuses ? Qui a inventé la mycothérapie ? Comment se débarrasser d'une mérule ? Quelles sont les espèces luminescentes ? La truffe est-elle vraiment aphrodisiaque ? Quel champignon peut-on cultiver chez soi, et comment ? Voici un beau livre abondamment illustré pour répondre à toutes ces questions (et quelques autres) et découvrir l'univers incroyable des mycètes.

Erratum

TOUCHÉ !

Une erreur s'est glissée dans l'infographie présentant les bâtiments actuellement en service dans la Marine nationale française, p. 47 de notre précédent numéro *Science & Vie Hors série*. Notre flotte comporte 4 sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), ainsi que 5 sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) et non 4 comme indiqué dans nos pages. Un de classe Rubis : l'*Améthyste* ; 4 de classe Suffren : le *Suffren*, le *Duguay-Trouin*, le *Tourville* et le *De Grasse*. Mille excuses pour cette erreur !

C'est dit

"Tous les champignons sont comestibles. Certains, une fois seulement"

COLUCHE, ***HUMORISTE, 1944-1986***

"Progressivement, l'observateur comprend que ces organismes sont reliés les uns aux autres, non pas de manière linéaire, mais en tissu semblable à un filet"

ALEXANDER VON HUMBOLDT, ***EXPLORATEUR ET NATURALISTE PRUSSIEN (1769-1859)***

SCIENCE&VIE

MAJ

L'INFO SCIENTIFIQUE MISE À JOUR

HORS-SÉRIE 289

L'entraide, moteur de notre évolution ?

Pour Evelyne Heyer, professeure d'anthropologie génétique, l'ouverture aux autres a façonné l'histoire et la diversité d'*Homo sapiens*. En révèlant des espèces humaines capables de coopérer, de communiquer, de transmettre et de se métisser, les progrès de l'archéologie et de la génétique bouleversent le récit de nos origines.

MÉDECINE

Des cerveaux sans corps

Des cerveaux isolés peuvent être maintenus artificiellement en vie pendant vingt-quatre heures, offrant aux chercheurs un nouveau terrain d'étude.

CLIMAT

La résistance du Karakoram à rude épreuve

Longtemps épargnée par le recul qui frappe les glaciers de Haute-Asie, cette chaîne montagneuse semble basculer à son tour.

© PASCAL ITO/FLAMMARION

"LA COOPÉRATION A COMPENSÉ NOTRE EXTRÊME FRAGILITÉ"

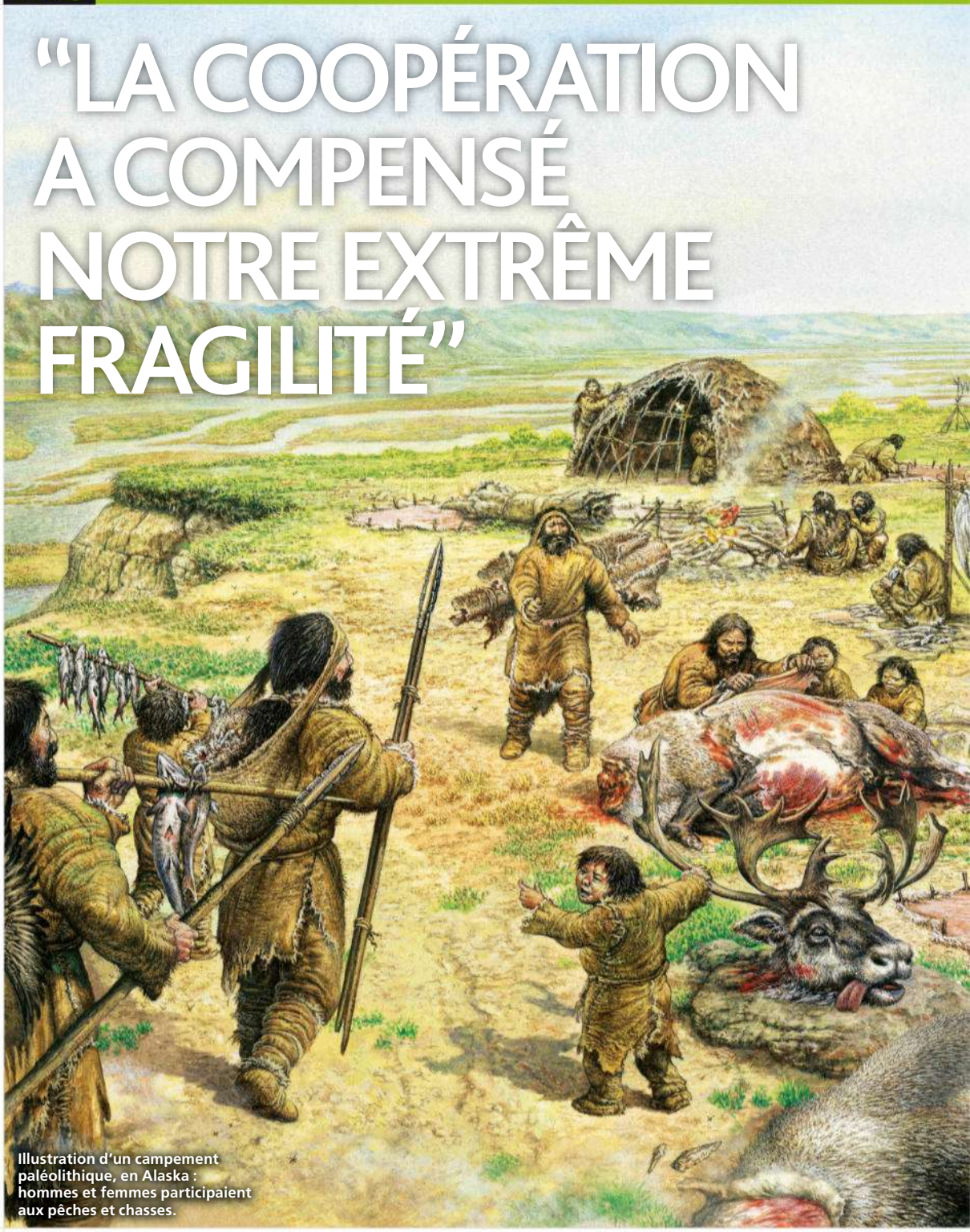
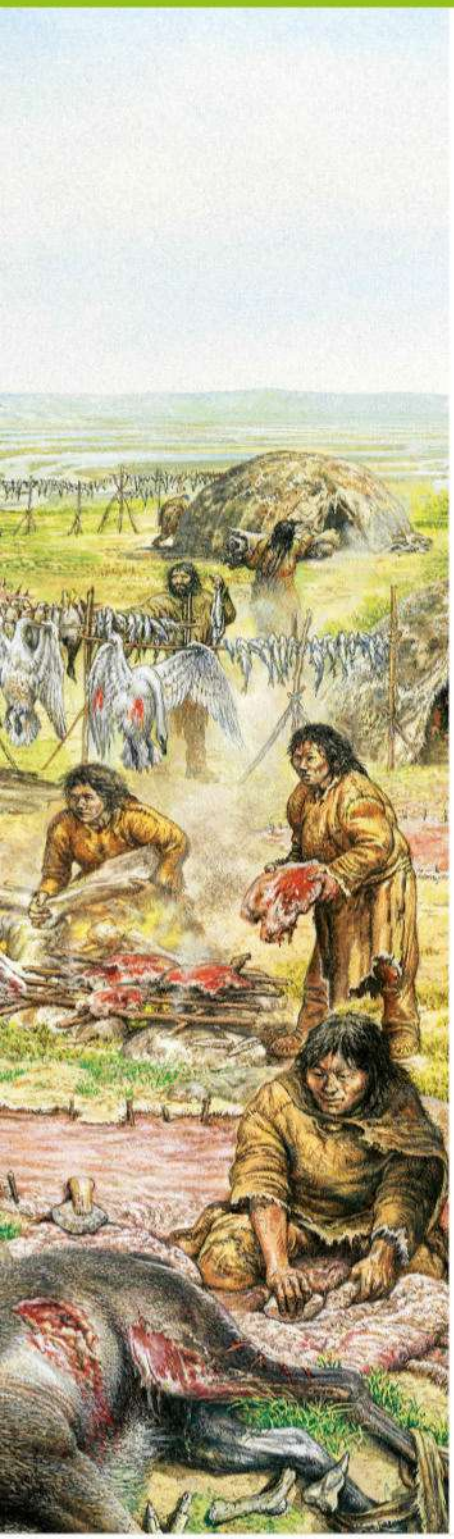


Illustration d'un campement paléolithique, en Alaska : hommes et femmes participaient aux pêches et chasses.

© JOHN SIBBICK/SPL



Femmes préhistoriques cantonnées à la cueillette, outils réservés à *Homo sapiens*… Evelyne Heyer*, biologiste et professeure d'anthropologie génétique, démonte ces clichés dans son nouvel opus, *L'Odyssée des humains***, et raconte une humanité façonnée par les migrations, les métissages et l'entraide.

PAR MICHAËL DUCOUSSO

SVHS : Votre nouvel ouvrage bat en brèche quelques idées reçues et les premières d'entre elles concernent la place de la femme dans les sociétés préhistoriques. Fini la femme des cavernes cantonnée à la cueillette pendant que monsieur chasse…

Evelyne Heyer : Exactement, les femmes participaient aux chasses, même s'il y a un bémol sur les chasses au très gros gibier, parce qu'il semblerait qu'il y ait eu des groupes dans lesquels cette chasse-là n'était pratiquée que par les individus masculins. Mais aujourd'hui, nous ne partons plus de l'a priori "c'est un homme qui a fait…" La préhistoire a commencé à être étudiée au XIXe siècle, une époque où l'on pensait naturellement que la femme était inférieure à l'homme. Aujourd'hui, la communauté scientifique s'est féminisée et travaille sur ces questions de façon beaucoup plus neutre, en analysant dans le détail pour voir s'il y a eu des différences genrées, en termes de hiérarchie ou d'activités.

SVHS : Cela a permis de constater, par exemple, que les femmes voyageaient bien plus que les hommes…

E. H. : Oui, en moyenne, dans notre espèce, ce sont les femmes qui ont le plus bougé. On l'observe dans la diversité de l'ADN mitochondrial, transmis par les femmes. Pour l'essentiel de ces mouvements, on sait déjà qu'il y a un facteur important, lié aux "mariages", même si, bien sûr, on n'en parlait pas ainsi à l'époque. Dans beaucoup de sociétés humaines, lorsque deux individus viennent d'endroits différents, c'est la femme qui rejoint l'homme. Il y a ainsi beaucoup plus de sociétés patrilocales que de sociétés matrilocales. C'est un phénomène que nous constatons sans pouvoir l'expliquer pour l'instant, même si nous observons certaines particularités. Par exemple, les sociétés d'éleveurs nomades sont quasi exclusivement patrilocales.

SVHS : Vous mettez en lumière un rôle longtemps sous-estimé,

celui des grands-mères. En quoi est-il si important pour l'espèce humaine ?

E. H. : En effet, nous sommes la seule espèce connue, avec les orques, dans laquelle les femmes survivent, de façon significative, au-delà de leur période de reproduction. C'est une chance, car la présence des grands-mères permet une meilleure survie des petits-enfants. Du fait de leur disponibilité, elles peuvent aider et, dans beaucoup d'endroits, les grands-mères qui vivaient le plus longtemps ont ainsi eu une meilleure descendance. On le constate à leur patrimoine génétique qui s'est mieux transmis au fil des générations. Plus globalement, nous avons développé un outil absolument génial entre êtres humains : la coopération. Un enfant n'est pas élevé uniquement par sa mère, mais par tout le groupe. Cela nous a donné un gros avantage par rapport aux autres espèces, malgré nos faiblesses en termes de reproduction et de survie des enfants. La coopération a compensé notre extrême fragilité.

SVHS : ***L'autre mise au point majeure de votre ouvrage concerne les différences entre l'Homo sapiens, ses ancêtres et les autres mammifères, notamment le rire…***

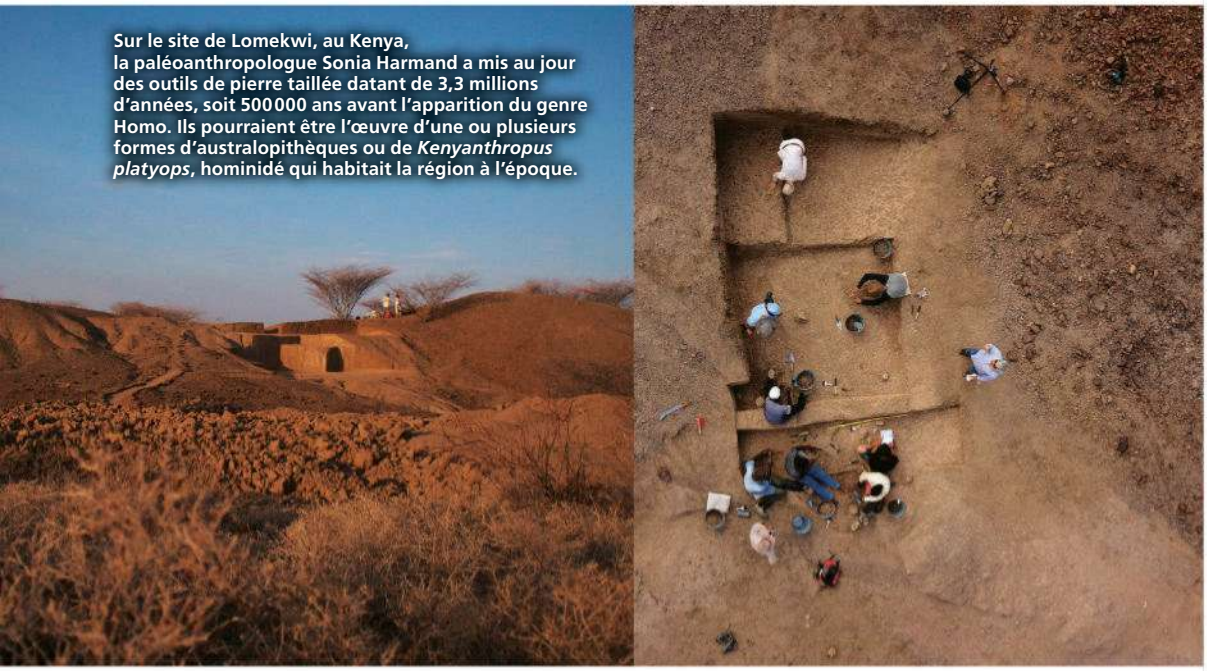
E. H. : En effet, sur le terrain, les éthologues voient des formes de rire chez des mammifères, principalement chez des individus juvéniles, lors des phases de jeu. Mais on observe moins de rires chez les adultes, contrairement aux humains qui rient à tout âge. Nous n'avons pas encore d'explications, mais le fait que nous ayons des cerveaux plus développés, avec des capacités d'abstraction supérieures, favorise sans doute une diversité des formes de rire au sein de notre espèce.

> *« Grâce au feu, nous avons rendu des aliments beaucoup plus digestes, ce qui nous aurait permis d'en tirer plus d'énergie pour assurer le développement de notre cerveau. »*

SVHS : ***Vous reliez d'ailleurs ce développement de nos cerveaux avec un point qui nous distingue radicalement des autres espèces : la maîtrise du feu.***

E. H. : Oui, c'est une hypothèse forte concernant l'encéphalisation de l'espèce humaine. Grâce au feu, nous avons rendu des aliments beaucoup plus digestes, ce qui nous aurait permis d'en tirer plus d'énergie pour assurer le développement de notre cerveau, mais également son fonctionnement.

© SONIA HARMAND/MPK-WTAP



Sur le site de Lomekwi, au Kenya, la paléoanthropologue Sonia Harmand a mis au jour des outils de pierre taillée datant de 3,3 millions d'années, soit 500 000 ans avant l'apparition du genre Homo. Ils pourraient être l'œuvre d'une ou plusieurs formes d'australopithèques ou de *Kenyanthropus platyops*, hominidé qui habitait la région à l'époque.

SVHS : ***Revenons à ce qui nous rapproche. Le genre Homo ne serait plus seul à confectionner des outils ?***

E. H. : Non, d'autres primates et même des dauphins utilisent des outils rudimentaires. Le site de Lomekwi, découvert en 2015 [*au nord du Kenya*, NDLR], a également prouvé que l'Australopithèque en utilisait. Sur ce site, des outils remontant à 3,3 millions d'années ont été mis au jour. C'est assez bluffant et cela pose beaucoup de questions très intéressantes, notamment : pourquoi sommes-nous la seule espèce à avoir connu un développement technologique si poussé ? Finalement, cela déplace la question et plein de chercheurs commencent à travailler sur ces nouveaux axes de réflexion.

SVHS : ***L'usage et la transmission de technologies plus poussées impliqueraient le recours à un langage complexe. Cela a-t-il été observé chez d'autres espèces ?***

E. H. : C'est là, justement, le bémol, mais la question reste étudiée, parce qu'à partir du moment où l'on déplace la frontière entre l'humain et le non-humain, il faut mieux comprendre où est la différence. Si on s'arrête sur les chimpanzés, les outils qu'ils fabriquent ne sont pas très sophistiqués et peuvent être copiés après une simple observation. Il n'y a pas besoin d'un langage complexe pour apprendre à casser des noix avec un caillou ou à utiliser un bâton pour chercher du miel. A contrario, les outils produits par Néandertal étaient plus élaborés. Or, la reconstitution de son pharynx montre qu'il était capable de prononcer des voyelles, qu'il était capable, d'un point de vue morphologique, de produire des sons ressemblant aux nôtres. Il avait probablement un langage plus complexe qu'on ne l'a longtemps pensé.

14 nuances d'humanité

– 14 espèces d'Homo se sont succédé sur terre.
– La majorité des Européens détiennent 2 % d'ADN provenant de Néandertal.
– Il faut remonter 4 000 ou 8 000 ans en arrière, selon les calculs, pour retrouver le premier ancêtre commun à tous les êtres humains actuels, sur notre arbre généalogique.
– *Homo erectus* est l'espèce humaine qui détient le record de longévité : elle a vécu 2 millions d'années, avant de s'éteindre, il y a 100 000 ans.

« Imaginons que toutes ces rencontres n'aient pas été violentes, cela signifierait que nous sommes plutôt ouverts à la différence, au point de se reproduire avec d'autres espèces. »

SVHS : Quand on voit les preuves de métissages entre Néandertal et Homo sapiens, on peut même imaginer un mode de communication commun…

E. H. : Il y a des chances, mais le problème, c'est qu'on ne sait toujours pas comment ces rencontres se sont déroulées, si elles étaient pacifiques ou plus violentes. Mais ce métissage est tout de même fascinant, car cela montre que l'on a coexisté avec d'autres espèces de la lignée humaine pendant très longtemps, sans s'ignorer. Imaginons que ces rencontres n'aient pas été violentes, cela signifierait que nous sommes plutôt ouverts à la différence, au point de nous reproduire avec d'autres espèces.

SVHS : Les Néandertaliens ont disparu il y a 30 000 ans. Cela signifie aussi que nous sommes l'unique espèce humaine sur le globe… Et que nous serons les prochains à nous éteindre. Devons-nous donc tirer des leçons de la disparation de Néandertal ?

E. H. : Nous ne savons pas exactement comment il a disparu, même si on commence à avoir quelques idées. Déjà, les Hommes de Néandertal n'étaient pas très nombreux. Alors qu'avec notre démographie galopante, nous avons minimisé les chances de disparition de l'espèce. Mais le fait qu'ils soient peu nombreux a également contribué à l'accumulation de mutations délétères dans leur ADN. Si bien qu'après l'arrivée de *Sapiens*, il n'a sans doute suffi que d'une petite perturbation pour accélérer leur disparition. Je pense

L'HUMANITÉ EN MARCHE

7 millions d'années
avant notre ère : le premier représentant de la lignée humaine apparaît.

300 000 ans
avant notre ère : *Homo sapiens* émerge en Afrique.

© JOSE ANTONIO PENAS/SPL

Cette illustration montre une Néandertalienne enceinte, petite et robuste, à droite, et à gauche, un *Homo sapiens*, plus grand et élancé.

SVHS : Vous concluez votre livre, en ironisant sur les prévisions concernant les humains du futur, transformés par l'omniprésence des écrans et le melting-pot génétique. Contrairement aux idées véhiculées, l'avenir de notre espèce ne passe pas par une forme de "standardisation"…

E. H. : Au contraire, ce qui risque de changer le plus vite, c'est notre apparence. Parce que les humains ne bougent pas plus qu'avant en proportion, mais en nombre absolu, si. Et ce mouvement conduit à des mélanges qui produisent de nouvelles combinaisons concernant les couleurs de peau, de cheveux ou d'yeux. Plus vous augmentez ces mouvements d'individus, plus vous augmentez la diversité au sein des populations, et nous verrons sans doute apparaître à l'avenir de nouveaux mélanges qui n'existaient pas avant. ▪

donc qu'il s'agit avant tout d'une question d'ordre démographique et il y a peu de chances pour que nous nous retrouvions dans la même situation de fragilité. Sauf, bien sûr, si nous détruisions tellement notre environnement que nous ne serions plus capables d'y survivre, si ce n'est grâce à certaines mutations qui finiraient par faire apparaître une nouvelle espèce. Mais comme nous sommes actuellement très nombreux, créer une nouvelle espèce humaine qui nous remplacerait prendrait énormément de temps. Ou alors il faudrait envoyer 200 personnes sur Mars et attendre que leurs descendants reviennent dans 10 000 ou 50 000 ans.

** Evelyne Heyer est professeur au MNHN, spécialiste en anthropologie génétique. Elle est l'autrice de* L'Odyssée des gènes *(Champs, 2022), ainsi que de* La Vie secrète des gènes *(Champs, 2024).*
*** éd. Albin Michel, le 16 septembre.*

70 000 ans
avant notre ère: *Homo sapiens* sort d'Afrique et se répand sur la planète. Il s'installe en Europe de l'Ouest il y a 40 000 ans.

30 000 ans
avant notre ère, l'Homme de Néandertal disparaît.

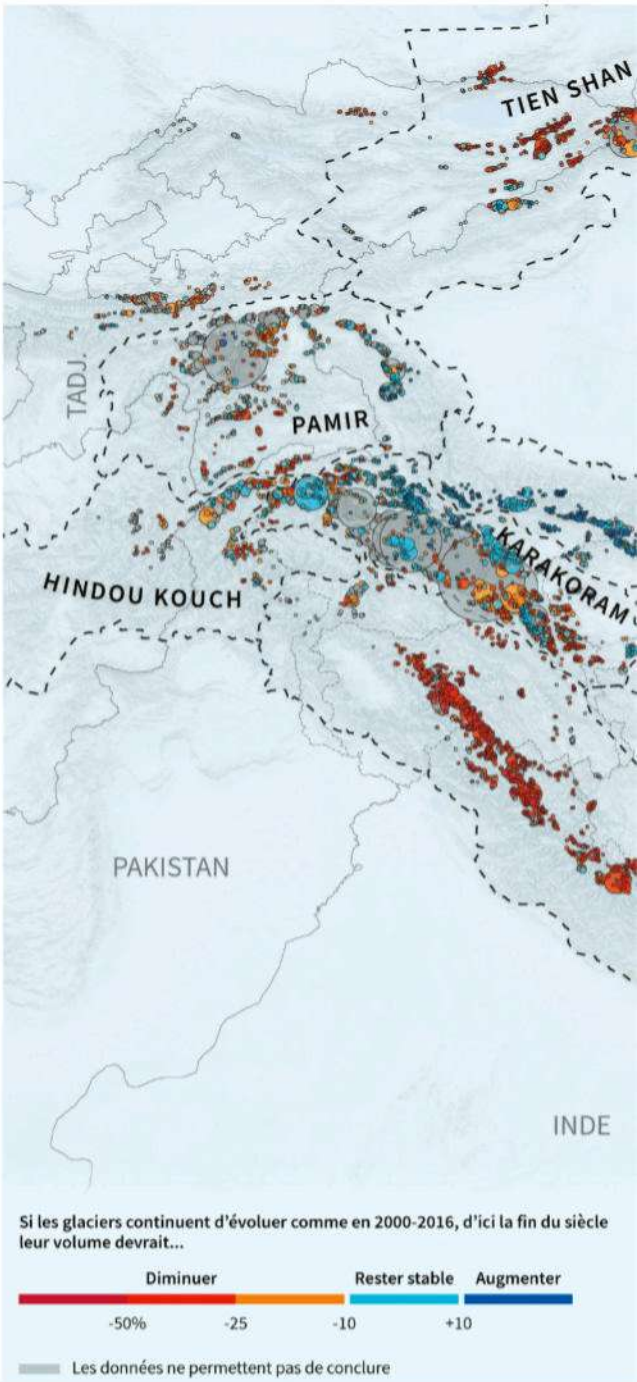
10 000 ans
avant notre ère: *Homo sapiens* se met à l'agriculture et à l'élevage.

Karakoram, l'exception

À la jonction du Pakistan, de l'Inde et de la Chine, au nord-ouest de l'Himalaya, les glaciers du Karakoram ont longtemps conservé un bilan de masse proche de zéro, parfois légèrement positif, quand la plupart des glaciers de Haute-Asie reculaient. Cette "anomalie" intrigue, car ces glaces alimentent notamment l'amont du fleuve Indus, et parce qu'elles testent la façon dont neige, température et circulation atmosphérique modulent le réchauffement. Dans une synthèse publiée en 2020 dans *Nature Geoscience*, une équipe de chercheurs suisse, néerlandaise et britannique examine plusieurs mécanismes possibles, sans retenir de cause unique : précipitations hivernales liées aux vents d'ouest, refroidissement estival observé durant une partie du XX^{e} siècle, relief abrupt favorisant les avalanches, nébulosité et albédo. Des débris rocheux recouvrent certains glaciers et peuvent, lorsqu'ils forment une couche épaisse, les protéger en partie de la chaleur. On ignore encore si ce phénomène explique la résistance de tout le Karakoram.

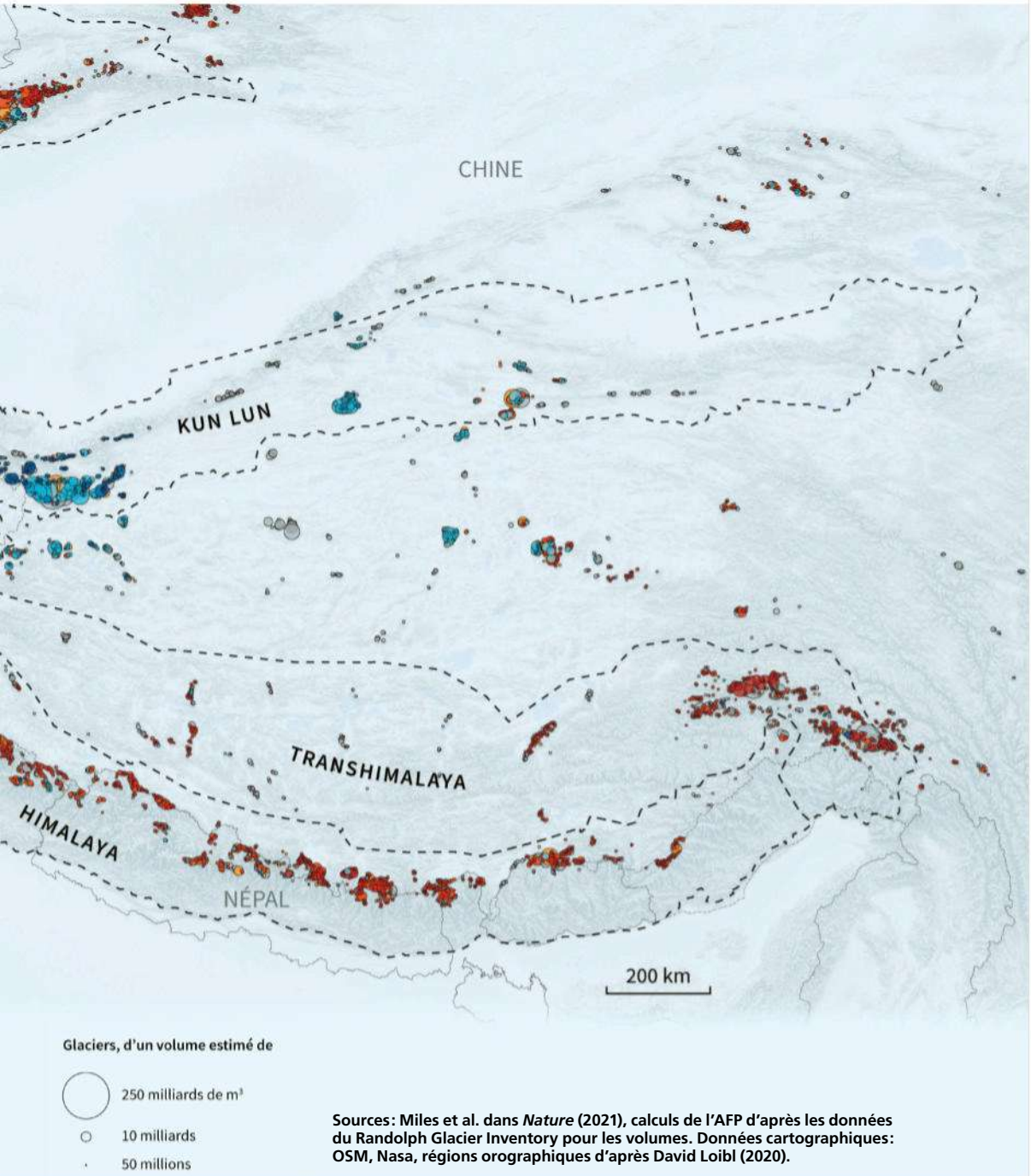
Mais le répit se fragilise. Dans une étude publiée fin 2025 dans *Science of the Total Environment*, des chercheurs ont analysé le bassin de la Hunza entre 1995 et 2021. Au col de Khunjerab, l'un des plus élevés au monde, la température annuelle proche du sol a augmenté de 0,33°C par décennie selon ERA5 – une reconstitution du climat combinant observations météorologiques et modèles numériques. Pour les auteurs, l'intensification du réchauffement estival, la diminution de l'enneigement et l'augmentation des débits indiquent que les glaciers de la région commencent à perdre de la masse.

Le phénomène s'inscrit dans une accélération globale. Le Service mondial de surveillance des glaciers (WGMS) estime qu'ils ont perdu près de 408 Gt en 2025, et 9 583 Gt depuis 1975, avec pour conséquence l'élévation du niveau de la mer d'environ 26,4 mm. Le Humboldt, au Venezuela, n'est plus qu'un champ de glace, l'Okjökull, en Islande, avait déjà perdu son statut de glacier. L'exception du Karakoram ne nie donc pas le réchauffement : elle montre qu'un relief peut retarder, mais non annuler les effets. ▪



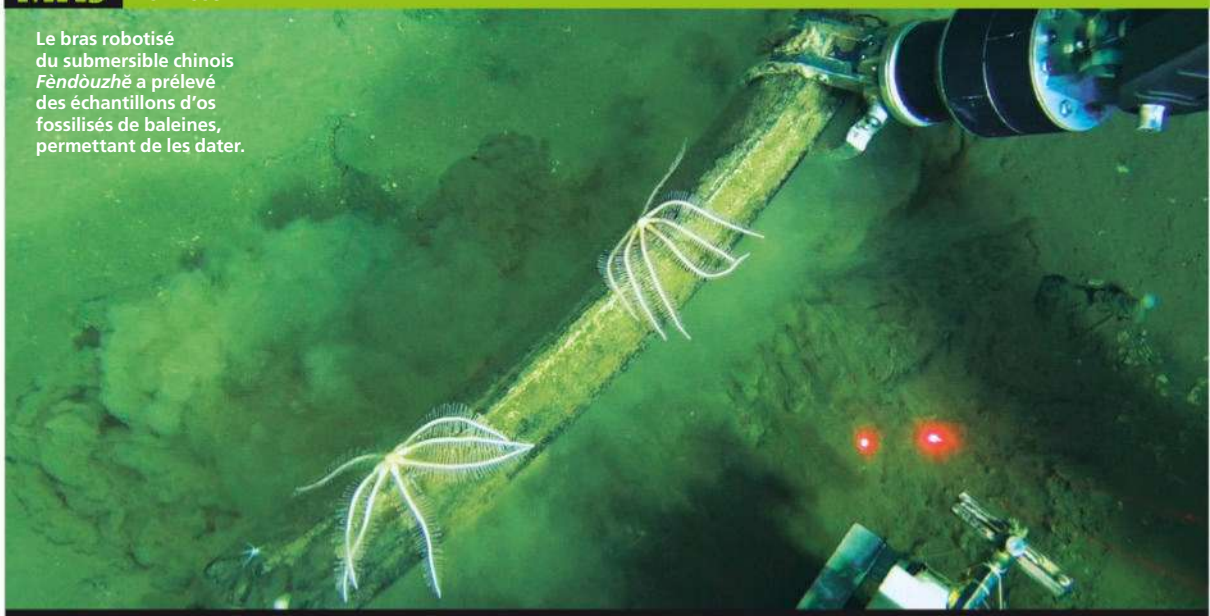
PAR MICHAËL DUCOUSSO ET AMANDA SCHREPF SANZ

glaciaire s'érode-t-elle ?



Sources : Miles et al. dans *Nature* (2021), calculs de l'AFP d'après les données du Randolph Glacier Inventory pour les volumes. Données cartographiques : OSM, Nasa, régions orographiques d'après David Loibl (2020).

© SABRINA BLANCHARD / AFP



Le bras robotisé du submersible chinois *Fèndòuzhě* a prélevé des échantillons d'os fossilisés de baleines, permettant de les dater.

LES BALEINES ONT-ELLES LEUR PÈRE-LACHAISE ?

Cette "nécropole" se nomme Diamantina. Une fosse plongeant à plus de 7 000 m sous le niveau de la mer et s'étendant sur près de 1 200 km, à l'ouest de l'Australie. Selon l'article publié dans *Nature,* en juin dernier, c'est là que l'équipe internationale dirigée par Xiaotong Peng, de l'Académie des sciences de Chine, a retrouvé des centaines de squelettes de cétacés, dont un remontant à 5,3 millions d'années et appartenant à une espèce jusque-là inconnue. S'agit-il pour autant d'un véritable cimetière ? Non. Cette vision anthropomorphique n'est pas validée par la science, pas plus que pour le fameux "cimetière des éléphants". En revanche, l'accumulation d'autant d'ossements de cétacés à un même endroit est véritablement exceptionnelle. Lorsque l'équipe de Xiaotong Peng a plongé dans cette fosse, pour une mission géologique à bord du bathyscaphe *Fèndòuzhě,* elle ne s'attendait clairement pas à trouver toutes ces carcasses. D'autant que d'ordinaire, les "sépultures de baleines" sont retrouvées à des profondeurs moindres et concernent rarement plus d'un individu. Mais l'emplacement de la fosse Diamantina, sur un couloir migratoire, peut expliquer la richesse du site. Pour les chercheurs à l'origine de cette découverte, cette dernière devrait inciter leurs confrères et consœurs à explorer d'autres fosses profondes, en quête de sites similaires, offrant une opportunité rare d'étudier certains cétacés particulièrement discrets, comme les baleines à bec, mais également des espèces et organismes qui se nourrissent de leurs dépouilles.

La sororité existe-t-elle chez les dauphins ?

Apparemment. Chez les grands dauphins, les femelles se protègent également des mâles aux comportements reproductifs agressifs. L'étude menée par Alice Bouchard, chercheuse en comportement animal à l'université de Bristol (Royaume-Uni), et son équipe, est assez révélatrice. Comme expliqué dans leur papier publié dans *PNAS,* en avril, en diffusant les signatures vocales de différents mâles dans les eaux de Shark Bay, en Australie, les scientifiques se sont aperçus que les femelles s'enfuyaient à toute allure en distinguant les vocalisations d'individus coercitifs, qu'elles aient déjà eu affaire à eux ou pas, par le passé. La preuve que leur mauvaise réputation se transmet au sein du groupe social.

© GLOBAL TREND/IDSSE - ADOBE STOCK

PAR MICHAËL DUCOUSSO

Est-ce que la monnaie virtuelle pollue ?

Oui, et pas qu'un peu : 16 000 MW ont été gaspillés, en 2025, pour des opérations de "minage" de Bitcoin infructueuses. Comme le notent Paolo Barucca et Carlo Campajola, de l'University College London, dans une étude réalisée en partenariat avec Jiahua Xu de l'Exponential Science Foundation, en Suisse, cela représente la moitié de la consommation annuelle d'énergie au Royaume-Uni. D'après leurs travaux publiés en mai dans *PNAS Nexus,* cette débauche d'énergie serait liée à l'ultra-compétitivité du secteur et au processus d'extraction des Bitcoins qui génère des déchets virtuels – ou "forks accidentels" – dont la production inutile se révèle particulièrement énergivore.

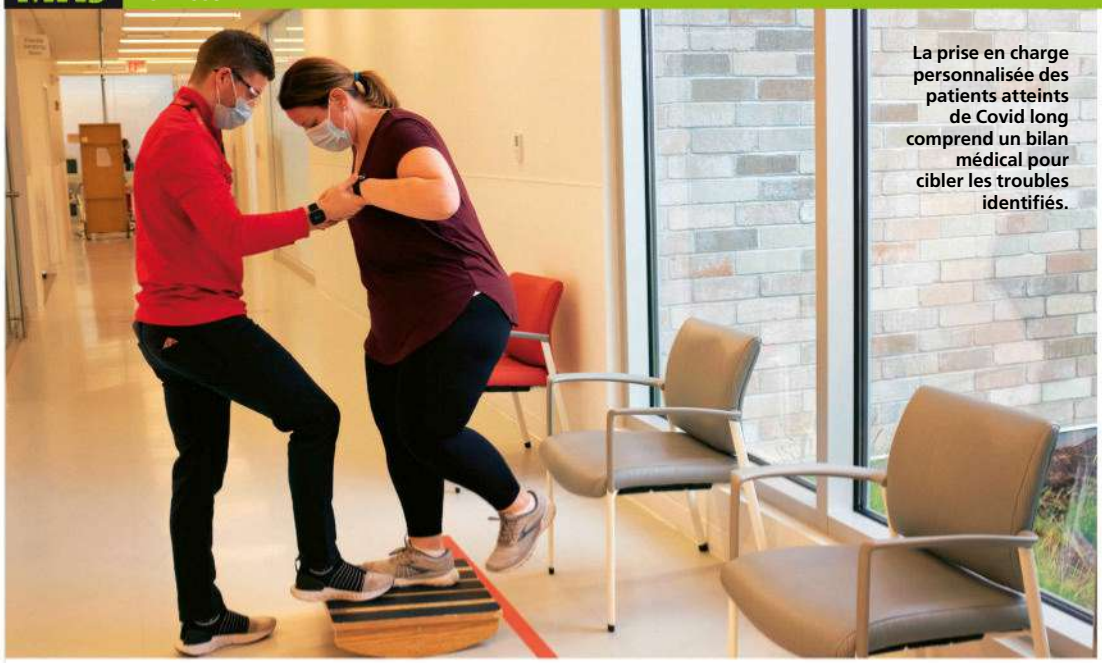
L'Ozempic lutte-t-il contre la criminalité ?

Cela a de quoi surprendre, mais il y contribuerait. Ce médicament à base de GLP-1, détourné de son usage antidiabétique à des fins amaigrissantes, est observé de près par les autorités sanitaires, car sa prise, hors d'un suivi médical, peut entraîner différents effets secondaires néfastes. En revanche, si l'on en croit l'étude publiée, en juin, dans *Criminology* par les chercheurs américains Daniel C. Semenza et Christopher Thomas, la consommation de GLP-1 réduirait les risques de comportements criminels violents. Cette hormone impacterait en effet l'impulsivité des individus, ainsi que leur consommation d'alcool, faisant ainsi baisser le nombre de crimes commis en état d'ébriété.

Nos cerveaux peuvent-ils survivre hors de nos corps ?

Oui, grâce au système BrainEx de l'entreprise Bexorg. Cet ensemble de machines forme un organisme artificiel permettant la "survie" de l'organe pendant 24 heures, même si l'activité de ce dernier est réduite à zéro sous l'effet d'un puissant anesthésique. Cela laisse un peu de temps aux chercheurs pour réaliser des tests médicamenteux. Selon le neuroscientifique Pierre-Marie Lledo, directeur de recherche au CNRS et chef d'unité à l'Institut Pasteur, qui s'est exprimé à ce sujet dans la revue *Polytechnique Insights,* en juillet, cela devrait permettre aux équipes de Bexorg d'avoir une meilleure connaissance des réactions de notre cerveau face à certains traitements, notamment ceux impliqués dans la lutte contre les maladies d'Alzheimer, de Parkinson et de Charcot.

© ADOBE STOCK - ABBFOTO/PICTURE ALLIANCE - RYAN CROSS/ENDPOINTS NEWS



La prise en charge personnalisée des patients atteints de Covid long comprend un bilan médical pour cibler les troubles identifiés.

Peut-on se rétablir d'un Covid long ?

C'est la note d'espoir apportée en avril 2026 par les premières conclusions du Long Covid EU Project. Après quatre années de recherches, menés dans six pays différents, ses résultats indiquent que le Covid long n'est pas nécessairement définitif : de nombreux patients s'améliorent et certains se rétablissent. On ne peut toutefois pas affirmer que tous les cas sont réversibles. Selon l'OMS, environ 6 % des personnes infectées développent une affection post-Covid. Fatigue intense, douleurs musculaires, essoufflement, troubles de la concentration ou altération du goût : plus de 200 symptômes ont été rapportés. Les chercheurs n'ont pas identifié de marqueur sanguin fiable pour distinguer les malades des personnes rétablies ni de preuve d'une infection chronique généralisée. Cela n'exclut pas toute anomalie chez certains patients. Le consortium avance l'hypothèse d'une réponse de défense qui resterait activée après l'infection. Le cerveau deviendrait trop sensible aux signaux du corps et continuerait à déclencher fatigue, douleur ou évitement de l'effort alors que la menace a disparu. Pour Cédric Lemogne, professeur de psychiatrie à l'université Paris Cité, *"de nombreux facteurs influencent l'évolution de la maladie, y compris la manière dont les symptômes sont interprétés"*. Autrement dit, le cerveau ne se contente pas de recevoir passivement les signaux du corps : sa manière de les décoder pourrait contribuer à entretenir les symptômes, mais aussi offrir une voie vers le rétablissement. *"La bonne nouvelle, c'est que ces facteurs peuvent être modifiés"*, souligne le professeur. Le rétablissement repose sur une prise en charge personnalisée : bilan médical, traitement des troubles identifiés, réadaptation progressive, soutien psychologique et aménagement du quotidien. La recherche se poursuit, après avoir déjà apporté des réponses encourageantes.

Les plantes apprécient-elles le son de la pluie ?

Oui, s'il apaise les humains, il aide également certaines plantes à croître. Une expérience du Massachusetts Institute of Technology a prouvé que les grains de riz exposés au son de la pluie tombant au sol poussaient de 30 % à 40 % plus vite que les autres. Comme l'ont expliqué Nicholas C. Makris et Cadine Navarra, dans la revue *Nature*, en avril, cette réaction serait déclenchée par la stimulation des statolithes – de minuscules capteurs internes – par les vibrations sonores.

© ALEX WROBLEWSKI/THE NEW YORK TIMES/REA

PAR MICHAËL DUCOUSSO

Faut-il avoir peur d'être dévoré par un écureuil ?

Plus maintenant mais, il y a 700 000 ans, nous n'aurions pas ri, face aux spermophiles arctiques. Une étude publiée en juin par une équipe internationale et pluridisciplinaire révèle que ces écureuils terrestres pouvaient être carnassiers à l'occasion. Dans *Nature Communications,* Tyler J. Murchie et ses compagnons détaillent le résultat de leurs analyses de coprolithes – les excréments fossilisés – de ces rongeurs, découverts dans le Yukon. On y retrouve de l'ADN de bisons, de chevaux et même de mammouths. La légende de l'éléphant effrayé par la souris, aurait-elle un fondement historique ?

Combien de temps pour terraformer Mars ?

Pour le savoir, il n'y a qu'une solution : tester le jeu mis en ligne par la revue *Nature*. Accessible gratuitement depuis votre navigateur, il confronte le joueur à différents choix, basés sur des hypothèses scientifiques crédibles. De l'efficacité de chacune dépend le temps que vous mettrez à terraformer Mars. Une façon ludique de découvrir les dernières théories concernant la terraformation de la Planète rouge et leur niveau de faisabilité.

Les robots peuvent-ils faire de l'escalade ?

Argus, oui, en tout cas. Ce petit oursin artificiel est l'incarnation du principe de symétrie dynamique observé dans la nature par les chercheurs de l'université Duke (Caroline du Nord, États-Unis). Comme ils l'ont rapporté en mai dans *Science Robotics,* Jiaxun Liu, Boxi Xia et Boyuan Chen ont étudié près de 1500 configurations robotiques différentes, avant d'estimer que cette machine dotée de 20 bras – et autant d'yeux – serait la plus mobile. Elle est en effet capable de grimper entre deux murs et de se déplacer sur des terrains difficiles. L'avenir de la robotique n'est peut-être pas constitué d'androïdes bipèdes, mais d'"oursinoïdes icosapèdes"…

© YUKON TERRITORIAL GOVERNMENT/THE CANADIAN PRESS/HO - ALLEN G. BREED/AP/SIPA

POUR EN SAVOIR PLUS

CETTE ÉDITION DE MÀJ ACTUALISE DES THÉMATIQUES TRAITÉES DANS CES PRÉCÉDENTS HORS-SÉRIES DE *SCIENCE & VIE*…

- #295 Dans la tête des animaux
- #300 Espace, une nouvelle histoire
- #302 Le monde avant les dinosaures
- #306 Agriculture, quelles solutions pour demain ?
- #315 Bien vieillir, les nouvelles pistes de la recherche
- #324 Vaincre la douleur, les nouvelles pistes scientifiques

PAR AMANDA SCHREPF SANZ

C'ÉTAIT ÉCRIT DANS SCIENCE&VIE

LE PASSAGER QUE L'AVION AVALA

COMMENT AU COURS D'UN VOL, LA DISPARITION DE RODNEY NASH A RÉVÉLÉ LES FRAGILITÉS DES PREMIÈRES CABINES PRESSURISÉES ET LES TÂTONNEMENTS DE LA SÉCURITÉ AÉRIENNE.

Le 20 avril 1957, à 21h50, les voyageurs du Super Constellation Téhéran-Paris somnolent à 5700m d'altitude. Soudain, une détonation, un cri, puis une fumée qui enveloppe un siège vide. Quelques minutes plus tôt, à cette même place où ne reste qu'un hublot béant, se tenait Jack Rodney Nash, 32 ans. Le passager vient d'être "éjecté" par la décompression : un accident jugé *"le plus extraordinaire du siècle"*. Dans le numéro d'août 1957 de *Science et Vie*, le médecin-commandant Violette ne mâche pas ses mots : *"L'avion pressurisé est une 'pétoire'."* Son principal suspect ? Le plexiglas. À chaque escale, le hublot passe de la chaleur de Téhéran au froid de l'altitude. Ces "plongées successives" dans des températures extrêmes tordraient la matière jusqu'à la rupture. Un scénario qu'il estime rarissime – *"une chance sur 100000, ou moins encore"* –, mais assez inquiétant pour relancer les débats : faut-il réduire les fenêtres et accentuer le sentiment d'enfermement de certains passagers ? Faut-il renforcer les matériaux ? Distribuer des parachutes ?

La disparition de Nash n'a pas, à elle seule, changé les règles du ciel. Elle est néanmoins devenue cruciale depuis les accidents du Comet survenus trois ans plus tôt, faisant 56 morts, et qui avaient révélé la fatigue du fuselage métallique : comment les matériaux résistent-ils à la répétition des vols, des pressurisations et des écarts de température ? Aujourd'hui, les hublots sont généralement composés de plusieurs panneaux structuraux, et leur résistance aux cycles de pression, aux écarts de température et à la défaillance d'un élément est vérifiée lors de la certification. De quoi regarder le paysage d'un œil un peu plus tranquille… Mais en s'assurant tout de même d'être bien accroché à son siège. Un vol parti de Thessalonique, en juillet dernier, a connu la rupture accidentelle d'un hublot et une dépressurisation brutale. Un homme a été partiellement aspiré vers l'extérieur, avant d'être retenu par sa ceinture de sécurité et ramené dans la cabine.

les enquêtes aériennes au niveau des compagnies commerciales, sera certainement une des plus navrées de toute l'histoire des accidents de l'air, depuis celui de Nuremberg et Colt ; si toutefois les conclusions ne sont pas pieusement conservées dans les tiroirs du boulevard Montparnasse.

Le plexiglas, point faible

En attendant l'étude officielle du cas Nash, le médecin-commandant Violette est un de ceux qui ont des idées précises sur la question. Il admet une chance sur 100000, ou moins encore, pour qu'un hublot de « Super-Constellation » éclate en vol ; mais les statistiques n'expliquent rien.

Le Dr Violette a sa théorie personnelle : au cours d'un vol normal, tel que le Téhéran-Paris, les plexiglas étanches qui constituent les fenêtres du « super », affrontent, en quelques minutes de montée, des différences considérables de température. Au décollage, à Téhéran, le hublot est en contact avec un air à 35° (la chaleur n'est pas encore insupportable en Iran à cette saison) ; quinze minutes après, à 6000 mètres, il fait — 24° sur la paroi externe du hublot et + 25° sur la paroi interne : 50° de différence entre les deux surfaces. La multiplication des « plongées successives » du plexiglas de + 25° à — 50°, après chaque escale, tandis que l'air de la cabine ne varie presque pas, agit sur cette matière comme une torsion sur un fil de fer.

Au bout d'un certain temps le plexiglas, affaibli, peut éclater sans qu'il paraisse encore possible de déterminer sûrement au bout de combien de montées et de descentes.

Si on n'utilise pas le verre dans les hublots des long-courriers, c'est que (celui-ci est encore plus dangereux (à moins qu'il ne soit armé)) : il se fend très facilement sous le givrage, comme une bouteille d'eau chaude plongée dans l'eau glacée ; et il est lourd.

Une météorite qui aurait heurté le hublot ? Difficile d'y croire.

Les « vibrations contrariées » ? Cette deuxième hypothèse sera très difficile à contrôler.

Les voyageurs ne veulent pas se sentir « enfermés »

S'il y a un risque, même infime, qu'un passager tranquillement accoudé à son hublot soit soudain projeté dans le vide à cause d'un défaut du plexiglas, ou de vibrations contrariées par la pression de son épaule, pourquoi ne fait-on pas des hublots plus petits ? Question inspirée par le bon sens. Constructeurs et compagnies ne veulent pas que le voyageur se sente enfermé ; ils fabriquent donc des hublots larges, et parlent de « syndrome de claustration ».

L'accident Nash, qui a eu deux précédents dans l'aviation civile (un navigateur « aspiré » au-dessus de l'Atlantique, en 1946 et, quelques années plus tard, un enfant indien enlevé brusquement des bras de sa mère), va certainement remettre en question l'importance donnée au « syndrome de claustration ».

Une seule victime

La décompression provoquée par le « départ » de M. Nash, n'a pas été explosive, selon les spécialistes. Si l'air extérieur, envahissant la cabine et provoquant le rouge blanc qui a surpris les passagers, n'a produit aucun malaise ni aucune lésion parmi ceux-ci, c'est à cause du « coefficient de décompression ». Quand l'avion se vide de son air pressurisé, passant ainsi d'une pression à une autre en moins d'une minute, la « vidange des poumons » pourrait être dangereuse ; mais la vitesse de la décompression a été calculée ; elle est relativement par la dimension limitée du hublot. Les stéréologistes français, travaillant sous la direction du général Grandpierre, ont fixé la dimension maximum d'un hublot d'après le cubage de l'appareil à 1 mètre carré pour 200 mètres cubes d'air.

Au moment de la disparition de M. Nash, l'avion volait en palier à 5700 mètres ; les passagers bénéficiaient d'une pression représentant celle de 2500 mètres grâce à la pressurisation. A l' « éclatement », leurs poumons se décomprimèrent aussi, mais lentement.

Redescendant en quelques minutes à l'altitude de 2300 mètres, le pilote du F-BGME a pu ramener à Istanbul, puis à Orly, ses passagers sains et saufs (malgré ce bain brutal dans l'air « insalubre » de 6000 m).

Sur la mort de M. Nash, l'avis de plusieurs spécialistes est formel : sa chute vertigineuse vers le sol ayant duré une minute et demi, il a certainement eu le temps de se rendre compte de son effroyable destin. Le manque d'oxygène en altitude peut provoquer une anoxémie, mais la rencontre, à partir de 4000 mètres, d'un air plus dense ranime, généralement, les pilotes de chasse éjectés dans des conditions similaires et dont le parachute ne s'ouvre pas, comme c'est arrivé, ou s'ouvre en retard.

Si Nash avait eu un parachute automatique déclenché à basse altitude, il aurait sans doute été sauvé, affirme le Dr Violette.

Parachute pour tous ?

Faut-il alors imposer un parachute-siège à tous les passagers, comme aux premiers temps de l'aviation ? Question plus facile à poser qu'à résoudre. Le même technicien estime également, mais à part lui, que la plupart des victimes du « Comet » auraient aussi été sauvées par un parachute. Le « Comet », dans deux cas au moins, s'est désintégré en l'air. La décompression n'a pas été explosive, comme sur le Téhéran-Paris, et les passagers sont morts de leur choc sur la mer.

Avant que les risques se trouvent augmentés par les conditions pénibles du vol à 17000 m dans les futurs long-courriers à réaction, il est nécessaire de réviser certaines conceptions de la sécurité aérienne. Et peut-être d'imposer au passager les règles strictes — et ennuyeuses — en usage dans les avions militaires.

Des matériaux plus résistants seront peut-être mis au point d'ici là ; à moins que les constructeurs ne fassent des hublots plus sûrs comme ceux de la « Caravelle », qui sont triangulaires.

YVES LAUREL

CONCOURS SCIENCE EN VUES

Le concours de photos de science co-organisé par *Réponses Photo, Science & Vie et Science & Vie Junior.*

RÉVÉLATION DES 12 GAGNANTS

Pour la Fête de la science

Samedi 3 octobre à 16h45

au MuAM - Musée des Arts et Métiers à Paris

Lors de la Fête de la science, découvrez les 3 gagnants de chaque catégorie : biodiversité, ciel nocturne, labo / recherche + les coup de cœur Junior

En présence de Greg Lecoeur.

NOTRE PARRAIN

Greg Lecoeur

Photographe animalier et naturaliste

Crédits photos : Greg Lecoeur

Merci à nos partenaires

Canon · MuAM · fête de la Science · cnrs · Échappées inattendues cnrs

Profitez de votre visite au MuAM pour participer aux **Échappées inattendues organisées par le CNRS.**

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'ESPACE
Liberté
Égalité
Fraternité

Publicité

fête de la Science

2 → 12 octobre 2026

Plus de 6 000 événements partout en France et à l'international : ateliers, conférences, jeux, parcours, festivals, spectacles vivants ou encore visites de laboratoires, de sites naturels et industriels.

* saveurs
** savantes

fetedelascience.fr

#FDS2026

Conception : Datcom 1 / Mesre — Image 3D : Westend61 / Getty images